

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА имени А. Н. БЕКЕТОВА

И. М. Патракеев

**ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
В МОДЕЛИРОВАНИИ
ГРАДОСТРОИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ**

МОНОГРАФИЯ

Харьков
ХНУГХ
2014

УДК [528:004.4'2/'6:519.854](477.54)
ББК [26.1+32.973.2+22.174](4Укр–4Хар)
П20

Автор

Патракеев И. М., доцент кафедры геоинформационных систем,
оценки земли и недвижимости

Рецензенты:

Палеха Ю. Н., доктор географических наук, профессор;
Омельяненко М. В., доктор технических наук, профессор.

Рекомендовано к печати

Ученым советом Харьковского национального университета
городского хозяйства имени А. Н. Бекетова,
протокол № 8 от 4 апреля 2014 г.

Патракеев И. М.

П20 Геопространственные технологии в моделировании
градостроительных систем: монография / И. М. Патракеев. Харк. нац.
ун-т гор. хоз-ва им. А. Н. Бекетова. – Х. : ХНУГХ, 2014. – 208 с.
ISBN 978-966-695-339-4

В монографии развивается методология системного анализа процессов развития крупных городов в условиях неопределенности. Неопределенность, сопровождающая развитие городов меняет традиционные представления о моделях города и процедурах подготовки и принятия решений о направлениях его развития. Методы и модели, экспериментальные данные, приведенные в настоящей работе, убедительно показывают преимущество технологии геопространственного моделирования развития градостроительных систем на основе классических однородных структур.

Монография рассчитана на широкий круг читателей, профессионально интересующихся проблемами городского развития, а также студентов и аспирантов кафедр геоинформатики, экономики, управления городским строительством, системных исследований и др.

УДК [528:004.4'2/'6:519.854](477.54)
ББК [26.1+32.973.2+22.174](4Укр–4Хар)

ISBN 978-966-695-339-4

© И. М. Патракеев, 2014
© ХНУГХ им. А. Н. Бекетова, 2014

*ПОСВЯЩАЕТСЯ ПАМЯТИ МОЕГО ОТЦА –
СИБИРЯКА, ОФИЦЕРА, НАСТОЯЩЕГО ПОЛКОВНИКА,
ТОМУ, КТО СФОРМИРОВАЛ МОЕ МИРОВОЗРЕНИЕ
И МОЮ ЖИЗНЕННУЮ ПОЗИЦИЮ.*

СОДЕРЖАНИЕ

Список принятых сокращений.....	6
Тезаурус исследуемой предметной области.....	7
ПРЕДИСЛОВИЕ.....	17
ВВЕДЕНИЕ.....	20
1. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ РАЗВИТИЯ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ.....	30
1.1 Городская среда и ее особенности.....	32
1.2 Определение городской системы.....	36
1.3 Эволюция города и развитие пространственной среды.....	39
Выводы.....	48
2. НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ В УПРАВЛЕНИИ РАЗВИТИЕМ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ.....	49
2.1 Источники неопределенности в процессе развития градостроительной системы.....	50
2.2 Три основные модели неопределенности.....	52
2.3 Особенности городской системы как объекта моделирования.....	54
2.4 Формальное описание класса городских систем.....	58
Выводы.....	60
3. КЛАССИЧЕСКИЕ ОДНОРОДНЫЕ СТРУКТУРЫ В МОДЕЛИРОВАНИИ ГОРОДСКОЙ ДИНАМИКИ.....	61
3.1 Базовая концепция моделирования на основе классических однородных структур.....	62
3.2 Типы классических однородных структур и отношений между ними. Понятие мелкозернистого параллелизма.....	69
3.3 Моделирование на основе классических однородных структур: игра Дж. Конвея «Life».....	70
3.4 Классические однородные структуры в моделировании пространственного развития градостроительной системы.....	72
3.4.1 Городское пространство как совокупность однородных структур.....	73
3.4.2 Преимущество однородных структур для моделирования пространственной организации градостроительной системы.....	76
3.4.3 Представление знаний о пространственной динамике градостроительной системы с использованием продукций.....	79
3.4.4 Определение понятия индекса соседства однородных структур.....	85
3.4.5 Многообразие подходов к определению локальных функций переходов для моделирования пространственной динамики градостроительных систем.....	86
3.5 Современная концепция однородных структур как основа для практического моделирования градостроительной динамики.....	86
3.5.1 Моделирование развития агломерации на основе теории однородных структур.....	86

3.5.2 Моделирование движения пешеходов в городских условиях.....	95
Выводы.....	100
4. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНЦЕПЦИИ ОДНОРОДНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ.....	101
4.1 Процесс городского развития и формализмы теории нечетких множеств.....	102
4.1.1 Нечетко множественное моделирование пространственных границ урбанизированных территорий.....	103
4.1.2 Некоторые понятия нечетких множеств.....	106
4.1.3 Функционально-пространственное развитие градостроительной системы как нечеткий пространственно-временной процесс.....	117
4.2 Нечеткая логика в моделировании функционально-пространственного развития градостроительных систем, основанное на однородных структурах.....	122
4.2.1 Общие понятия о лингвистической переменной и нечеткой логике.....	123
4.2.2 Основные понятия нечеткого управления.....	138
4.2.3 Нечеткое управление в моделях развития градостроительных систем, основанных на однородных структурах.....	142
4.3 Совершенствование моделей развития градостроительных систем на основе нечеткой логики.....	146
4.3.1 Временной аспект процесса градостроительного развития городской территории.....	146
4.3.2 Развитие градостроительной системы как нечеткий процесс.....	149
4.3.3 Локальные функции перехода z-автомата и логический вывод.....	153
4.3.4 Процесс дефазификации.....	162
Выводы.....	165
5. ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ПЛАНИРОВОЧНЫХ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ.....	166
5.1 Модель поиска пригодной территории для размещения промышленного предприятия в пределах городской границы.....	167
5.1.1 Разработка концептуальной модели поиска пригодной территории на основе применения геоинформационных технологий.....	167
5.1.2 Моделирование неопределенности средствами геоинформационных технологий.....	170
5.2 Современная практика размещения новых градостроительных объектов на сложившейся территории.....	176
5.2.1 Пространственно-планировочное решение по размещению АЗС на сложившейся территории (на примере Коминтерновского административного района города Харькова).....	178
Выводы.....	191
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	192
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	194

Список принятых сокращений

ГС	– градостроительная система
ГИС	– геоинформационная система
ДЗЗ	– дистанционное зондирование Земли
ТОС	– теория однородных структур
КА	– клеточный автомат
ЛФП	– локальная функция переходов
ОВС	– однородные вычислительные среды и системы
МТ	– машины Тьюринга
ПГ	– параллельная грамматика
СПП	– система продукций Поста
ТФГ	– теория формальных грамматик
ЛПР	– лицо принимающее решение
ЛП	– лингвистическая переменная
d-ОС	– <i>d</i> -мерные однородные структуры
ВС	– вычислительные системы
ГФП	– глобальная функция перехода
ДПДС	– дискретная параллельная динамическая система
ИНСГЕМ	– интеллектуальная среда геопространственного моделирования
МТ	– машина Тьюринга
ОВСС	– однородные вычислительные системы и среды
ОС	– однородные структуры
ОСП	– однородные структуры с памятью
ПК	– персональный компьютер
ППР	– пространственно-планировочное решение
ПП	– параллельные подстановки
СКА	– системы компьютерной алгебры
ТФГ	– теория формальных грамматик
УМТ	– универсальная машина Тьюринга
ШС	– шаблон соседства
ЭС	– экспертная система
ЯПП	– язык параллельных подстановок

Тезаурус исследуемой предметной области

В этой работе ставится задача развить основы градостроительства до уровня современной системной методологии, достижений общей и прикладной теории систем. Такое задание требует развития категориально-понятийного аппарата градостроительной деятельности и его согласование с другими системными науками. Приведем основные определения, которые обеспечивают однозначность понятий в рамках наших размышлений.

Тезаурус научной дисциплины градостроительство базируется на таких фундаментальных категориях как система, пространство, потенциал, свойство и включает следующие операбельные понятия. Тезаурус составлен на основе использования источников [1, 2, 3, 4, 5, 6].

А

Агломерация (от лат. *agglomerare* – присоединяю, накапливаю): компактное расположение, группировка поселений, объединенных не только в территориальном смысле, но обладающих развитыми производственными, культурными, рекреационными связями. Термин относится преимущественным образом к поселениям городского типа (городская агломерация).

Аналитическое высказывание – высказывание, истинность или ложность которого может быть установлена исключительно на основе анализа его грамматической или логической структуры. Примеры истинных аналитических высказываний – логические законы.

Б

Бифуркация – это приобретение нового качества в движениях динамической системы при малом изменении ее параметров. Знание основных бифуркаций позволяет существенно облегчить исследование реальных систем (физических, социальных, экономических и др.), в частности предсказать характер новых движений, возникающих в момент перехода системы в качественно другое состояние, оценить их устойчивость и область существования.

В

Высказывание – мысль, выраженная повествовательным предложением и могущая быть истинной или ложной.

Г

Градостроительное пространство (ГП) – многовекторное пространство людских, природных, функциональных и временных факторов, в которых реализуется жизненный цикл градостроительных систем.

Городская агломерация – компактное скопление населённых пунктов, главным образом городских, местами срастающихся, объединённых в сложную многокомпонентную динамическую систему с интенсивными производственными, транспортными и культурными связями. Городская агломерация – этап урбанизации.

Городская территория – это ресурс, обусловленный особыми свойствами городского пространства, обеспечивающий ускорение прогрессивных тенденций развития производственных сил.

Городская среда – это совокупность множества природных, архитектурно-планировочных, экологических, социально-культурных и других условий, в которых обитает городской житель и которые определяют комфортность его проживания на данной территории.

Градостроительная система – совокупность пространственно организованных и взаимосвязанных материальных элементов — технически освоенных территорий, зданий и сооружений, дорог и инженерных коммуникаций, совместно с природными компонентами, формирующих среду общественной жизнедеятельности на разных территориальных уровнях.

Д

Динамизм градостроительного пространства – обобщающее свойство, которое характеризует смену параметров и состояния городского пространства в пространстве и времени.

Динамическая система – система, под действием внешних и внутренних сил изменяющие во времени свои состояния. Представления о динамических системах возникли как обобщение понятия механической системы, поведение которой описывается законами динамики Ньютона. В современной науке понятие динамической системы охватывает системы практически любой природы – физические, химические, биологические, экономические, социальные и др. При этом системы характеризуются различной внутренней организацией – жестко-детерминированные, стохастические, нелинейные, системы с элементами самоорганизации, самоорганизующиеся.

Динамика классических d -ОС – локальное взаимодействие автоматов шаблона соседства каждого единичного z -автомата, то есть локальный алгоритм, который выполняется параллельным образом на основании информации о состояниях единичных автоматов из локальной окрестности (определяемой индексом соседства) текущего z -автомата Z^d -пространства классической ОС-модели.

Е

Евкли́дово протра́нство (также **Эвкли́дово протра́нство**) — в изначальном смысле, пространство, свойства которого описываются аксиомами евклидовой геометрии. В этом случае предполагается, что пространство имеет размерность равную 3. В современном понимании, в более общем смысле, может обозначать один из сходных и тесно связанных объектов, определенных ниже. Обычно n -мерное евклидово пространство обозначается E^n .

Ж

Жизненный цикл градостроительной системы охватывает этапы ее существования: проектирования, внедрения, использования, ликвидации и рекультивацию градостроительного пространства.

З

Земельный участок – часть поверхности земли, имеющая фиксированные границы, площадь, местоположение, правовой статус и другие характеристики, отраженные в земельном кадастре и документах государственной регистрации прав на земельные участки.

Землепользователи – лица, владеющие и пользующиеся земельными участками на праве постоянного (бессрочного) пользования или на праве безвозмездного срочного пользования.

Землевладельцы — лица, владеющие и пользующиеся земельными участками на праве пожизненного наследуемого владения.

И

Индекс соседства — определяет позиции z -автоматов-соседей относительно каждого конкретного единичного z -автомата, который имеет с ними непосредственный информационный интерфейс.

Исчисление высказываний — логика высказываний, задаваемая системой постулатов (аксиом и правил вывода).

К

Клеточные автоматы (КА) — один из типов бесконечных абстрактных автоматов со специфической внутренней организацией, обуславливающей высокий уровень распараллеливания обработки информации и вычислений; КА образуют специфический класс дискретных динамических систем, функционирующих сугубо параллельным образом на основе принципа локального близкодействия.

Л

Логический закон — название законов, образующих основу логической дедукции; схема логической связи высказываний, выражаемая общезначимой формулой логики (аксиомой или теоремой), убедительность которой вытекает из одного только истолкования входящих в нее логических операций и по существу не связана с фактической истинностью "наполняющих" ее высказываний.

Логика высказываний — раздел логики, в котором вопрос об истинности или ложности высказываний рассматривается и решается на основе изучения способа построения высказываний из т.н. элементарных (далее не разлагаемых и не анализируемых) высказываний с помощью логических операций конъюнкции («и»), дизъюнкции («или»), отрицания («не»), импликации («если..., то...») и др. Логику высказываний, задаваемую системой постулатов (аксиом и правил вывода), называют исчислением высказываний.

Локальная функция переходов — задает состояние каждому единичному z -автомату структуры в момент времени t на основе состояний всех соседних ему автоматов (согласно X -индекса соседства) в момент времени $(t-1)$.

М

Модель (фр. *modèle*, от лат. *modulus* — «мера, аналог, образец») — это упрощенное представление реального устройства и/или протекающих в нем процессов, явлений. Построение и исследование моделей, облегчает изучение имеющихся в реальном устройстве (процессе, ...) свойств и закономерностей. Применяют для нужд познания (созерцания, анализа и синтеза).

Моделирование — это способ замещения реального объекта, используемый для его исследования, когда натуральный эксперимент невозможен, дорог, опасен, долговременен.

Морфология городского пространства (МГП) – это различия в использовании территории города (типы застройки и типы конвенционально определяемого функционального использования) в зависимости от внешних факторов (внешними по отношению к городу как социальному явлению будут и рельеф, и административные границы) и от закономерностей внутренних процессов.

О

Однородное пространство (Z^d) – представляет собой множество всех d -мерных кортежей – целочисленных координат точек в евклидовом E^d пространстве, т. е. представляет собой целочисленную решетку, элементы которой служат для пространственной идентификации единичных z -автоматов структуры.

ОС-модель – формальная модель параллельной обработки, перспективная среда для физического и математического моделирования.

Однородная среда – описывает физическую организацию структуры и ее геометрию. Представляет собой совокупность: множество состояний z -единичных автоматов, однородное пространство – (Z^d), X – индекс соседства. Статическая часть ОС-модели.

П

Природно-ресурсный потенциал территории (ПРПТ) – совокупность природных ресурсов территории, которые могут быть вовлечены в хозяйственный оборот с учётом экономической целесообразности и возможностей научно-технического прогресса. В общем виде природно-ресурсный потенциал состоит из 8 основных частных потенциалов: географического положения; минерального сырья; рельефа; климатических условий; водных ресурсов; земли, включая почвенные ресурсы; растительности, включая лесные ресурсы; животного мира, включая рыбные ресурсы.

Пространственная ситуация – зафиксированное на определенный момент времени состояние элементов многомерного пространства.

Пространственная организация – структурно-параметрическое и пространственно-временное упорядочивание и согласование элементов и связей пространства, которое обеспечивает эффективность использования его потенциала и развитие градостроительных систем.

Пространственный потенциал градостроительного пространства (ППГП) – ресурсные характеристики векторов градостроительного пространства, которые могут быть использованы для достижения эффективности и гармоничного развития градостроительных систем.

Пригородная зона – территория, которая обеспечивает пространственное и социально-экономическое развитие города.

Р

Развитие города – это процесс, при котором количество единиц жилья и его общая площадь, а также объем услуг некоммерческих организаций («бесплатных» общественных благ) увеличиваются быстрее, чем количество жителей и общее количество рабочих мест. При этом значение последнего параметра примерно соответствует количеству городских жителей в трудоспособном возрасте; вынужденная безработица отсутствует. Комфортность проживания в таком городе возрастает, что вызывает переезд в него все новых и новых жителей.

Размерность однородного пространства ОС-модели (d) дифференцирует множество моделей на подмножества: одномерной ($d=1$) и высших ($d \geq 2$) размерностей. При этом, переход уже от 1-мерного к 2-мерному случаю изменяет динамику ОС-моделей, обусловленную сложностью решаемых задач.

Рост города – это процесс при котором когда количество жителей и рабочих мест растет быстрее, чем количество единиц жилья и объем предоставляемых общественных благ. Город становится все менее удобен для жизни, но все еще притягателен для переезда в него (хотя бы наличием высокооплачиваемых рабочих мест на новых предприятиях).

С

Системный анализ — научный метод познания, представляющий собой последовательность действий по установлению структурных связей между переменными или элементами исследуемой системы. Опирается на комплекс общенаучных, экспериментальных, естественно научных, статистических, математических методов.

Системный подход — направление методологии научного познания, в основе которого лежит рассмотрение объекта как системы: целостного комплекса взаимосвязанных элементов (И. В. Блауберг, В. Н. Садовский, Э. Г. Юдин); совокупности взаимодействующих объектов

(Л. фон Берталанфи); совокупности сущностей и отношений (Холл А. Д., Фейджин Р. И., поздний Л. фон Берталанфи).

Система – (от греч. *systema* – целое, составленное из частей; соединение), совокупность элементов, находящихся в тесных отношениях и связях между собой, которая образует определенную целостность, единство. Претерпев длительную историческую эволюцию (начиная с Евклида, Платона, Аристотеля), понятие системы с середины XX в. становится одним из ключевых философско-методологических и специально-научных понятий.

Основоположником общей теории систем является Людвиг фон Берталанфи (1969). Понятие системы тесно связано с понятиями целостности, структуры, связи, элемента, отношения, подсистемы и др.; оно имеет чрезвычайно широкую область применения; практически каждый объект может быть рассмотрен как система.

Системный подход – направление методологии научного познания, в основе которого лежит рассмотрение объекта как системы: целостного комплекса взаимосвязанных элементов (И. В. Блауберг, В. Н. Садовский, Э. Г. Юдин); совокупности взаимодействующих объектов (Л. фон Берталанфи); совокупности сущностей и отношений (Холл А. Д., Фейджин Р. И., поздний Берталанфи).

Сложная система – составной объект, части которого можно рассматривать как **системы**, закономерно объединённые в единое целое в соответствии с определенными принципами или связанные между собой заданными отношениями.

Синергетика (от греч. *συν-* — приставка со значением совместности и греч. *ἔργον* — «деятельность») - междисциплинарное направление **науки**, изучающее общие закономерности явлений и процессов в сложных неравновесных системах (физических, химических, биологических, экологических, социальных и других) на основе присущих им принципов самоорганизации.

Субурбанизация — развитие пригородов (от лат. *suburbs* — пригород). Первоначально она проявляется в возникновении вокруг крупных городов пригородов. В итоге формируются городские агломерации — взаимосвязанные группы поселений (прежде всего городские), объединенные различными видами связей (трудовые, производственные, рекреационные, инфраструктурные и др.) в динамичные системы. Затем начинается более быстрое развитие пригородов (прежде всего демографическое) по сравнению с центральным

городом. Численность населения в центральных городах постепенно сокращается.

Суждение — форма мышления, представляющая собой сочетание понятий, из которых одно (субъект) определяется и раскрывается через другое (предикат).

Сценарий развития города — проектируемая схема (модель) определяющая тенденции развития городских систем в будущем периоде при выбранных приоритетах.

Стратегия развития города — выбор ключевых направлений развития, интегрирующий главные центры города политику и действия городского сообщества в некое согласованное целое. Правильно сформулированная стратегия позволяет упорядочивать и распределять ограниченные ресурсы города эффективным образом на основе предвидения изменений во внешней среде и имеющихся внутренних возможностей с учетом ожидаемых и неожиданных помех, угроз и противодействий.

T

Территория – часть земной поверхности с воздушным пространством и расположенными под ней недрами в определенных пределах (границах), имеющая определенное географическое положение, природные и созданные в результате деятельности людей условия и ресурсы.

Территориально-урбанистическая структура (ТУС) – соотношение и взаиморасположение территорий с различной степенью урбанизированности, с различными направлениями и темпами урбанизации (Г. М. Лаппо).

Теория градостроительства – изучает планировочную организацию систем расселения и населённых мест, особенности их формирования, функционирования и развития во взаимосвязи с социально-экономическими и природными условиями. В теории градостроительства исследуются закономерности формирования и функционирования градостроительных образований, разрабатываются принципы и критерии принятия проектных решений.

Территориальное планирование – планирование развития территорий, в том числе для установления функциональных зон, зон планируемого размещения объектов капитального строительства для государственных или муниципальных нужд, зон с особыми условиями использования территорий.

Территориально-пространственное планирование (ТПП) – это методы, широко используемые государственным сектором для оказания влияния на будущее распределение деятельности в пространстве.

Осуществляется в целях создания более рациональной территориальной организации землепользования и обеспечения взаимосвязи между различными ее формами, сбалансированности потребностей развития с необходимостью охраны окружающей среды и достижения целей социального и экономического развития (Европейская Комиссия, 1997 год).

Тождественная истинность – свойство сложных высказываний быть истинными в силу своей формально-логической структуры и смысла используемых в них логических операций. Будучи независимыми от содержания входящих в них конкретных высказываний, тождественно-истинные высказывания выступают в качестве логических законов.

У

Урбанизм (лат. *urbanus* — городской) — направление, в градостроительстве, возникшее в начале XX века, представители которого утверждали идею главенствующей и безусловно позитивной роли городов в современной цивилизации и в связи с этим уделяли основное внимание проектной разработке максимально укрупнённых градостроительных структур, рассчитанных на значительную концентрацию населения. Основополагающее значение для становления теории урбанизма, особенно интенсивно развивавшейся после Второй мировой войны и в 1950 гг., имела деятельность Ле Корбюзье.

Урбанизация (от лат. *urbanus* – городской) – процесс повышения роли городов в развитии общества. Предпосылки урбанизации – рост в городах промышленности, развитие их культурных и политических функций, углубление территориального разделения труда. Для урбанизации характерны приток в города сельского населения и возрастающее маятниковое движение населения из сельского окружения и ближайших малых городов в крупные города (на работу, по культурно-бытовым надобностям и пр.). Процесс, обратный урбанизации, называется «рурализацией».

Урбанистическая структура – это соотношение городских поселений различной величины (людности) в общем их числе, суммарной численности населения.

Устойчивое развитие территорий – обеспечение при осуществлении градостроительной деятельности безопасности и благоприятных условий жизнедеятельности человека, ограничение негативного воздействия хозяйственной и иной деятельности на окружающую среду и обеспечение охраны и рационального использования природных ресурсов в интересах настоящего и будущего поколений.

Урбанизированные территории – это элементы (объекты) системы расселения, для которых характерны следующие свойства:

- профессиональные занятия населения в большинстве или в подавляющем большинстве не связаны с сельскохозяйственными работами;
- наблюдается высокая концентрация обмена информацией, кооперации людей в их деятельности, направленной к наиболее выгодному использованию материальной среды в целях благоустройства данного объекта и социального благосостояния населения;
- существует высокоэффективное производство за счет интенсивного разделения труда;
- существует внутренняя целостность этих объектов, обусловленные устойчивыми социально-функциональными связями значительного по численности населения (в пределах 1–1,5 час. на регулярные поездки в одном направлении);
- высока интенсивность общественных форм жизни.

Ф

Фрактал (лат. *Fractus* – дроблёный, сломанный, разбитый) – геометрическая фигура, обладающая свойством самоподобия, то есть составленная из нескольких частей, каждая из которых подобна всей фигуре целиком. В математике под фракталами понимают множества точек в евклидовом пространстве, имеющие дробную метрическую размерность (в смысле Минковского или Хаусдорфа), либо метрическую размерность, отличную от топологической.

Фрактальная структура (англ. *fractal structure*) – (от лат. *fractus* - дробный, ломанный) структура, которая обладает свойством самоподобия, то есть состоит из таких фрагментов, структурный мотив которых повторяется при изменении масштаба.

Ш

Шаблон соседства – геометрический образ z -автоматов соседей пространства однородных структур.

Э

Эффективность градостроительной системы (ЭГС) характеризует уровень использования ресурсов градостроительного пространства для получения полезных эффектов и уменьшения негативных последствий от их функционирования.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Современный этап развития человеческого общества характеризуется возрастанием роли науки, ее воздействия на все сферы человеческой деятельности. Осуществление этих функций сопровождается количественными и качественными изменениями: в самой науке, одновременным действием двух тенденций — дифференциации и интеграции различных областей научного знания (Д. М. Гвишиани).

Одним из наиболее результативных проявлений интегративной тенденции в науке является — системный анализ.

Его особенностью является ориентация исследователей на весь комплекс проблем, возникающих в связи с изучаемым феноменом: от вербального описания через познание их сущности до построения формальных моделей, создания средств обеспечения рационального управления. Сложность систем, являющихся объектами исследования в этом научном направлении, понятие скорее качественное, чем количественное. Оно не всегда связано с количеством элементов в системе, либо с числом факторов, влияющих на ее поведение, либо с геометрическими размерами системы. Хотя, конечно, все указанные характеристики дают представление о степени сложности системы.

Но более важным здесь является несколько иной аспект. Суть его в том, приобретает ли система, как целое, новые свойства по сравнению со свойствами образующих ее элементов.

Молекулы газа, находящегося в сосуде, хаотически движутся, а в результате газ приобретает вполне определенную температуру. Или другой пример: обмен ресурсами в условиях рыночной экономики является в значительной степени случайным, но в результате устанавливается некоторая постоянная норма прибыли.

В этих примерах мы имеем дело с системами совершенно разной природы и размеров. Однако в них проявляется нечто общее: и та и другая система как целое приобретает новое свойство, отличное от свойств ее частей.

Эти новые свойства системы как целого являются следствием системного эффекта. Большинство проблем, для решения которых привлекается методический арсенал системного анализа, связаны именно с изучением системных эффектов.

Наиболее остро эти проблемы стоят в пространственных системах глобального, регионального, городского уровней. Специфика пространственной системы заключается в том, что характеристики ее пространственной организации являются основными показателями ее состояния.

Пространственные системы являются благодатным объектом системного анализа потому, что на пространственные элементы неизбежно воздействуют самые разнообразные факторы: экономические, социальные, экологические, технические, психологические и т. д.

Типичным примером пространственной системы является городская система. Комплексные исследования городских систем стимулируются прежде всего потребностью целенаправленного управления, прогнозирования их развития, устранения нежелательных явлений в функционировании, повышения общей эффективности.

Процесс развития города, который проявляется прежде всего в изменении его территории и численности населения, порождает целый ряд проблем, связанных с условиями проживания, экономикой, транспортом, с деградацией качества окружающей среды, с управлением весьма разветвленным городским коммунальным хозяйством. Поэтому сейчас, когда процесс урбанизации во многих странах мира принял угрожающие размеры, предпринимаются попытки вмешательства в естественные городские процессы с целью их регулирования. Цель этих попыток заключается в том, чтобы, с одной стороны, планировать развитие города, учитывая его естественные тенденции и желаемое течение, а с другой — сформировать некоторый механизм, позволяющий реализовать разработанные планы и корректировать их в необходимых случаях. С их помощью можно бороться с отрицательными тенденциями в городских процессах, с возмущениями, вносимыми внешней средой и направлять развитие города по желаемому руслу.

Исследованию городских систем посвящена обширная литература. Проблемы городского развития обсуждаются специалистами в области философии, экономики, градостроительства, социологии, географии, физики, математики, управления.

В данной монографии развивается методология системного анализа процессов развития крупных городов в условиях неопределенности. Основное внимание уделено неопределенности основанной на теории нечетких множеств, вызванной влиянием случайных факторов различной

природы. Неопределенность, сопровождающая развитие городов, в особенности в условиях переходной экономики, меняет традиционные представления о моделях города и процедурах подготовки и принятия решений о направлениях его развития. С системных позиций разработаны основные этапы и методика моделирования динамики развития градостроительных систем на основе классических однородных структур. Инновационной особенностью моделей, рассматриваемых в монографии, является интеграция методов нечетких множеств и нечеткого логического вывода с классическими однородными структурами.

Методы и модели, экспериментальные данные, приведенные в монографии, показывают преимущество технологии геопространственного моделирования развития градостроительных систем на основе классических однородных структур.

Кроме того, монография интегрирует обширную литературу по данной проблематике, в том числе и работы авторов, которые образуют ее каркас.

Материал монографии безусловно заинтересует научных работников, а также специалистов-практиков, студентов и аспирантов кафедр геоинформатики, экономики, управления городским строительством, системных исследований и др., занимающихся проблемами городского развития.

Зам. директора по науке,
руководитель базового центра ГИС
Государственного предприятия
«Украинский государственный
научно-исследовательский институт
проектирования городов «Дипромисто»
имени Ю. Н. Белокося, д.г.н. профессор



Палеха Ю. Н.

Качество и обоснованность градостроительных решений обеспечивается комплексом проектно-планировочных работ, методологией системно-структурного анализа, полноценное использование которых нуждается в современной информационной базе, в упорядочивании понятийно-терминологического аппарата.

*член-корресподент АГ Украины,
доктор архитектуры, профессор Демин Н.Н.*

ВВЕДЕНИЕ

Проблематика управления градостроительной системой в современных реалиях приобретает новые грани актуальности. Сегодня жизнь выводит на передний план необходимость перейти к более целостному представлению о единстве городского пространства и его социальной сущности. Современное развитие крупных городов, процессы урбанизации нашей жизни в целом повышают роль социального познания и интерпретации этих явлений в любой деятельности, а тем более в деятельности органов власти и управления местного уровня.

Процессы современной городской жизни в значительной степени многоплановы и динамичны и в настоящее время требуются новые подходы к их осмыслению и прогнозированию возможных перспектив развития городов. Понимание города как процесса требует нового, нетрадиционного взгляда на данный социокультурный феномен [34]. Такой подход актуализирует необходимость углубленного изучения и разработки инновационных методов управления и прогнозирования городских процессов, участия населения в выработке городской политики.

Традиционная структурно-функциональная парадигма (объектно-структурный подход) управления городом была нацелена на создание социальных систем по заданным принципам и параметрам. Основой проектирования выступал нормативный прогноз, представлявший собой научный расчет наиболее оптимального и рационального состояния социальных систем, создававшихся для достижения определенных целей.

В современном обществе ситуация изменилась. Возросшая динамика социальных изменений трансформировала представления о будущем: оно стало пониматься как социокультурный проект желаемого состояния, который вырабатывается в процессе коммуникации.

Пришло понимание, что «город – это, прежде всего, особым образом организованное, обитаемое жизненное пространство-время. Оно создается

деятельностью людей, ментальность, культура, биографии, жизненные стратегии и повседневные запросы которых и составляют социальную основу сотворения рукотворных городских ландшафтов» [92]. То есть городская среда обладает гораздо большим числом измерений и сфер управления, основным субъектом его должно быть само население города и его отдельных районов. Объектом же управления в таком разрезе становится взаимодействие, процесс коммуникации, в ходе которого формируется функционально-пространственная организация города.

Сегодня на смену традиционным взглядам приходят новые интерпретации самого понятия «город» и формируются новые подходы к управлению и прогнозированию этим сложным полифункциональным объектом. Город в современных условиях относят к многочисленному классу объектов, характеризующихся нелинейным развитием. Планирование городских процессов формализованными методами на макроуровне ограничено стихией и энтропией развития крупных городов как сложных социально-пространственных систем. Вместе с тем, различные сферы города, представляющие особые направления его функционирования или развития, требуют целенаправленного воздействия на них, то есть управления ими для поддержания в определенном состоянии или перевода из одного состояния в другое. Любой крупный город – динамично развивающаяся система, которая быстро наращивает своеобразную конфигурацию экономического, демографического, культурного, организационного потенциала роста, детерминируя полифункциональность, многопрофильность развития его жизнедеятельности, а также влечет за собой смены традиционных форм занятости и повседневных практик горожан на более многообразные.

Кроме того, современный город представляет собой неоднородную систему, в которой на достаточно компактной территории взаимодействуют объекты различного функционального назначения. Как система, город имеет многослойную полиструктуру и включает в себя ряд подсистем, которые связаны технологическими, ресурсными и информационными коммуникациями. К подсистемам городской жизни можно отнести сферу приложения труда, жилье, обслуживание, досуг и т. п., а также коммуникации, обеспечивающие связи между элементами городской среды и городскими сообществами. Все подсистемы и связи между ними находят локализацию в определенном социальном пространстве.

Город, таким образом, может рассматриваться и как специфическая пространственная среда, которая формируется в процессе развития общества. Пространственная организация любого города тесным образом связана с социальной организацией общества, природно-географическими условиями, техническими возможностями, финансовыми ресурсами и целым рядом других факторов, и, в известной степени, зависима от них. Однако само воздействие этих факторов и закономерностей проявляется в пространственной организации города и может быть адекватно описано только при опоре на систему знаний об организации функционально-пространственной среды. Поэтому город может рассматриваться как пространственная совокупность материальных и духовных элементов, объединенных между собой устойчивыми функционально-пространственными связями, которые определяют структуру городской системы [96].

Процесс развития города, который проявляется прежде всего в изменении его территории и численности населения, порождает целый ряд проблем, связанных с условиями проживания, экономикой, транспортом, с деградацией качества окружающей среды, с управлением разветвленной системой городского коммунального хозяйства. Сегодня уже более половины населения мира живет в малых и крупных городах. По прогнозам, уже через поколение города станут домом для двух третей человечества. В настоящее время ООН призывает к разработке национальных стратегий в области городского управления, направленных на разрешение целого ряда проблем, связанных со стремительной урбанизацией.

Более того эксперты сравнивают последствия роста числа городских жителей с цунами. Исполнительный директор Программы ООН по населенным пунктам (ООН-Хабитат) Хуан Клос заявил, что «...мы наблюдаем огромный процесс урбанизации. Проблема в том, что институциональная архитектура не поспевает за темпами урбанизации». Глава Хабитат призвал к перепроектировке городов, городскому планированию на национальном, государственном и местном уровнях с тем, чтобы избежать в будущем появления неформальных поселений, а также высокую концентрацию населения в столицах и мегаполисах.

Представитель ООН отметил, что политика планирования поможет странам обеспечить своих граждан рабочими местами, условиями для

процветания и в то же время даст возможность спланировать меры по решению проблем в сфере окружающей среды.

Для рационального управления территориями в современных условиях следует опираться на научную теорию. Стало уже привычным планировать и оценивать деятельность организаций на основе теории организаций. К сожалению, научная база управления территориями развита пока явно недостаточно. Это особенно болезненно сказывается на подготовке управляющего персонала. Если будущих руководителей организаций сегодня учат современному менеджменту, то будущему руководителю территорий приходится по-прежнему опираться исключительно на опыт своих предшественников [2, 5, 10].

Поэтому сейчас, когда процесс урбанизации принимает угрожающие размеры, предпринимаются попытки вмешательства в естественные городские процессы с целью их регулирования.

Цель этих попыток состоит в том, чтобы, с одной стороны, планировалось развитие города, учитывая его естественные тенденции развития, а с другой стороны, – ***сформировать некоторый инструментарий, позволяющий реализовать разработанные планы и корректировать их в случае необходимости.*** С помощью такого инструментария можно бороться с отрицательными тенденциями в городских процессах, с возмущениями, вносимыми внешней средой, и направлять развитие города по желаемому направлению.

Исследованию городских систем посвящена обширная литература. Проблемы городского развития обсуждаются специалистами в области философии, экономики, градостроительства, социологии, географии, физики, математики, кибернетики.

Большинство публикаций на эту тему связано с исследованием не проблемы в целом, а отдельных ее аспектов, присущих той или иной из перечисленных научных дисциплин. Проблемы изучения и исследования городских процессов чрезвычайно сложны, в связи с чем настоящее время требует применения интегрированных интеллектуальных технологий для моделирования городских систем.

Существующие различные городские модели имеют высокую степень субъективизма, который проявляется в том, что модели содержат множество параметров, характер изменения которых задается, как правило, произвольно, кроме того, современные модели предписывают системе некоторое оптимальное поведение в соответствии с назначаемым

критерием оптимальности. Все указанные недостатки ведут к снижению, а иногда к полной потере доверия к результатам моделирования.

Современная практика решения задач градостроительства характеризуется высоким уровнем применения методов математического моделирования социальных, экономических, технологических и иных процессов и объектов городской среды, объемной и качественной информационной поддержкой (на основе широкого и многоуровневого внедрения вычислительных технологий, телекоммуникационных средств, в сочетании с использованием высокоточных измерительных технологий).

Настоящее время характеризуется быстрым ростом объема доступных данных, увеличением скорости их обработки и передач. В ситуации лавинообразного нарастания объемов информации и вычислительных мощностей возникает естественный вопрос, каким образом можно повысить эффективность прогнозирования перспектив развития городских процессов.

Помощь приходит со стороны апробированных классических математических методов, созданных трудами Ньютона, Лейбница, Эйлера и других гениев прошлого, заложивших фундамент современных вычислительных алгоритмов. Благодаря им сейчас имеются специализированные вычислительные процедуры для распознавания образов, для управления системами различных классов. Независимые от этого направления исследования в области искусственного интеллекта привели к созданию экспертных и прогностических систем, основанных на символьной обработке и использующих базы правил.

Такие технологии, объединенные в англоязычной литературе под названием *Computational Intelligence*, позволяют получать непрерывные или дискретные решения в результате обучения по доступным имеющимся данным. Одним из подклассов таких технологий составляют классические однородные структуры – новая и весьма перспективная среда моделирования дискретных параллельных процессов, явлений и феноменов такой специфической социопространственной среды как город. Следующим подклассом являются нейронные сети, использующие стохастические алгоритмы для обучения модели с учителем или путем самоорганизации. Нейронные сети предназначены для обработки цифровых данных по которым алгоритмы обучения выстраивают однонаправленные или рекуррентные модели развития городских процессов.

При моделировании пространственной и функциональной организации городского сообщества возможности нейронных сетей могут усиливаться за счет применения технологии обработки информации, основанной на нечетких множествах и нечетких выводах. Этот метод связан с оцениванием функции принадлежности элементов к множествам с помощью нечетких логических операторов. Предполагаемый подход не только ослабевает требования к точности и определенности данных в процессе моделирования, но и позволяет описывать пространственное распределение материальных и духовных объектов, что в свою очередь формирует пространственную структуру города, с помощью переменных, значения которых определяются на интуитивном уровне.

Еще одним важным классом алгоритмов, который усиливает возможности классических однородных структур, являются эволюционные или генетические алгоритмы. Они позволяют эффективно исследовать пространство возможных сценариев пространственно-временного развития городских систем.

На рис.1 видно, что задачи классических однородных систем (в англоязычной терминологии *Cellular Automata*), нейронных сетей, генетических алгоритмов и нечетких множеств могут рассматриваться вне связи между собой, однако их интеграция позволяет сформировать интеллектуальную среду моделирования на основе рассмотренных вычислительных технологий [3].

Геоинформационные технологии становятся неотъемлемой частью современных систем управления территориями развитых стран, они становятся универсальным методом решения многих управленческих задач.

Интеграции геоинформационных технологий и технологий обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) по ряду причин предшествовал длительный период изолированного развития. На начальном этапе функционирования систем дистанционного зондирования информация, получаемая с их помощью, носила закрытый характер и была доступна государственным органам наиболее развитых в области космических исследований стран.

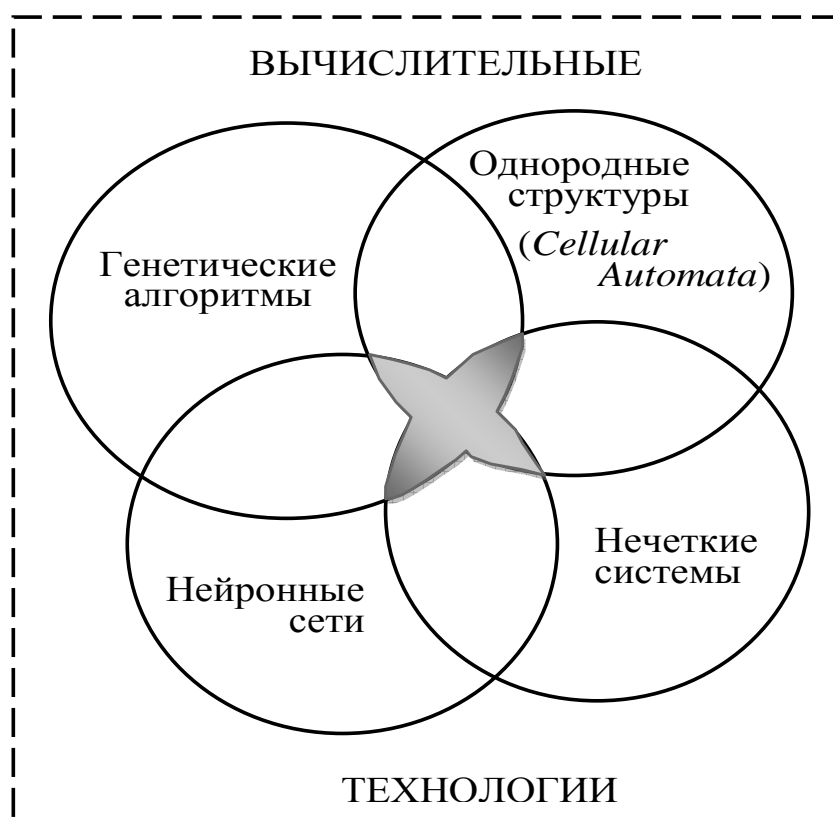


Рис. 1 – Взаимосвязи между нейронными сетями, однородными структурами, генетическими алгоритмами и нечеткими системами

Вплоть до окончания «холодной войны» ДЗЗ были недоступны не только для коммерческого использования, но и для подавляющего большинства научных исследований. Основным источником данных в ДЗЗ была и остается фотограмметрическая информация, дополняемая другими видами съемок. Благодаря цифровым многоканальным снимкам, можно получать ценную информацию для нужд администраций муниципальных образований для создания и корректировки градостроительной документации, а также информацию экономического, социально-культурного и стратегического характера. Однако главной особенностью снимков является предоставление первичной информации о местности в «неискаженной» форме.

Сейчас геоинформационные технологии и технологии ДЗЗ становятся неотъемлемой частью современных систем управления территориями развитых стран, они становятся универсальным методом решения многих управленческих задач. Сугубо прагматической целью системы управления территориальными локализациями и земельными ресурсами является повышение эффективности использования земли на основе создания

условий для увеличения производительного, инвестиционного и социального потенциала земли как важнейшего экономического ресурса.

В моделировании управления территориями понятие «геопространство» приобретает фундаментальное значение. Оно формируется на основе баз данных компьютерной среды с использованием геоинформации и моделей изучаемого геопространства на основе геодезических, картографических и географических данных.

Интеграция современных вычислительных технологий с технологиями геоинформационных систем и средств дистанционного зондирования Земли на современном этапе развития информационных технологий позволяет создать интеллектуальную среду геопространственного моделирования (ИНСГЕМ) для моделирования, решения пространственных задач, выработки пространственных решений и визуализации процессов развития градостроительных систем (рис. 2). Очевидно, что для управления территориями нужны программные среды еще более высокого уровня и адаптированные к решению новых задач.



Рис. 2 – Интеллектуальная среда геопространственного моделирования (ИНСГЕМ), как интеграция современных технологий обработки пространственных данных

В настоящее время как в Западной Европе, США, других высокоразвитых странах усиливаются исследования теоретических проблем в градостроительстве, которые потом реализуются в сфере практической деятельности. К сожалению, в Украине ничего подобного не происходит. Имеют место высказывания отдельных ученых о необходимости моделирования и прогнозирования городского развития, но они вытекают из представлений 30–45-летней давности.

Теоретико-методологические проблемы геопространственного моделирования градостроительных систем изучены недостаточно полно. Нерешенными остаются проблемы построения пространственно-временных прогностических моделей развития урбанистических пространств, слабо разработаны инструментарии анализа характера современных процессов формирования урбанистических пространств, а также социо-экономических изменений, происходящих в ходе пространственного развития в границах территориальных сообществ.

При оценке качества приходится учитывать как количественные, так и качественные ее характеристики. С одной стороны, существует набор критериев для количественной оценки, а с другой стороны, множество неформализуемых показателей, состав и содержание которых в значительной степени зависит от лиц принимающих решения. В таких условиях процедура поиска оптимального градостроительного решения неизбежно становится субъективной, а модель градостроительной системы исполняет роль генератора вариантов.

Таким образом, сформировался вполне логически завершенный метод системного исследования проблем градостроительного развития, последовательному изложению которого посвящена настоящая монография.

Материал монографии распределен по пяти разделам.

Первый из них посвящен содержательному описанию города, выявлению его особенностей как функционально-пространственной системы. Рассмотрен механизм развития градостроительной системы в пространстве и времени, дана характеристика понятию геопространства и описаны основные его атрибуты.

Во втором разделе излагаются вопросы, связанные с одним из центральных понятий в современной теории и практике управления – неопределенностью. Рассмотрены основные источники неопределенности в управлении градостроительными системами.

Третий раздел посвящен исследованию применения базовой концепции моделирования развития градостроительных систем на основе классических однородных структур. Определены основные элементы *ОС*-пространства, показаны преимущества моделирования градостроительных систем с использованием однородных структур. Городское пространство рассматривается как совокупность однородных структур (клеточных автоматов). На примере решения практической задачи сделан вывод о возможности применения *ОС*-концепции как основы для практического моделирования городской динамики.

Четвертый раздел монографии посвящен совершенствованию концепции *ОС*-подхода на основе нечетких множеств, которые позволяют усилить возможности классических однородных структур и тем самым повысить эффективность разрабатываемой интеллектуальной среды геопространственного моделирования функционально-пространственного развития градостроительной системы. Территория населенных пунктов представлена на основе нечетко-множественного подхода.

И наконец, в пятый раздел вошел материал, связанный с конкретными прикладными задачами, решенными с использованием рассмотренных методов, изложенных в первых разделах.

Здесь рассмотрены две задачи. Первая связана с разработкой модели поиска пригодной территории для размещения промышленного предприятия в пределах городской черты и вторая задача связана с размещением новых градостроительных объектов на сложившейся территории на примере Коминтерновского административного района города Харькова.

Несмотря на то, что большая часть монографии посвящена обсуждению различных математических проблем городского развития, она рассчитана на широкий круг читателей, интересующихся проблемами геопространственного анализа градостроительных систем.

1. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ РАЗВИТИЯ ГОРОДОВ

*Город – это сила...,
а большой город – большая сила...*

из фильма «Брат»

Город – специфическая, особая пространственная среда, которая формируется в процессе развития общества и становится оболочкой для множества проявлений общественной жизни. Город в целом можно представить как единый объект, который подобно сооружению, создается человеком для определенных целей и отражает уровень технических возможностей и социально-экономических потребностей общества.

Однако в отличие от отдельного дома или автомобиля, город имеет значительно больший физический размер и более сложную организацию. Даже в современных условиях часто оказывается весьма сложно, а то и невозможно, полностью решить задачу прогнозирования его развития.

Формирование города, как правило, представляет длительный, растянутый во времени процесс, а точнее – совокупность огромного множества похожих по характеру, стереотипных, единичных процессов, которые регулируются множеством проектов, идей, волевых актов, наконец, стихийных явлений и случайностей (строительство отдельных зданий, участков магистралей, коммунальных объектов и т. п.). В этом смысле город можно сравнить с естественным образованием типа кристаллической структуры, кораллового рифа или колонии бактерий, форма которых отражает в первую очередь специфические свойства, среды их обитания [7].

Город характеризуется высокой степенью дифференциации и интеграции составляющих его частей, иерархически соподчиненных в рамках единого функционального целого.

В развитии и формировании города часто приходится сталкиваться с явлениями количественного роста и структурными преобразованиями. Вместе с тем город обладает высокой «живучестью» и «устойчивостью» по отношению к внешним «возмущениям» и изменению различных

функциональных «нагрузок». Город представляет собой целостное образование по отношению к окружающей среде, потребляет и перерабатывает элементы своего окружения (сырьевые и энергетические ресурсы, воду и т.п.) и одновременно выбрасывает в окружающую среду значительную часть неиспользованной продукции (промышленные отходы, сточные воды, выбросы в атмосферу и т.п.). Эти особенности города дают основание рассматривать город в некоторых отношениях как подобие живого организма, имеющего сложное внутреннее строение и естественные механизмы регулирования, которые обеспечивают его выживание в условиях активного взаимодействия с внешней средой.

Город является одним из высших проявлений цивилизации; он заключает в себе уникальный опыт человеческой культуры. Город – это не только памятник материальной и духовной культуры, помогающий осмыслить и объективно оценить современность, но и во многом формирует и определяет новые тенденции в развитии человека и общества, играя роль своеобразной, постоянно меняющейся матрицы, на основе которой идет непрерывный отбор новых культурных и общественных форм.

Всем этим никак не исчерпывается даже самая краткая и обобщенная характеристика города как явления. Здесь обозначены лишь некоторые ее стороны для того, чтобы передать всю сложность, многоплановость и противоречивость городской реальности, которой неизбежно проникается любой, кто рассматривает город как объект своей исследовательской или проектной, организационной или художественной деятельности. Многоплановость и противоречивость городской реальности еще больше усиливается при попытке перейти от качественных описаний и более четкому определению границ рассматриваемого явления.

Существуют различные классификации городов: по численности населения (крупнейшие, крупные, средние, малые), по времени возникновения (исторические, новые), по виду основной занятости населения (промышленные, научные и другие центры), по связи с другими поселениями (города-центры, агломерации, города в групповых системах расселения и др.). Однако само понятие «город» до сих пор не получило достаточно полного определения.

Известный урбанист, экономист-географ, доктор географических наук Хорев Б. С. определял современное понятие города как «постоянно

трансформирующееся, размывающееся в экономическом, пространственном и социально-демографическом аспектах».

1.1 Городская среда и ее особенности

Городская среда – это совокупность огромного числа объектов, которые и создают городское пространство. Городская среда влияет не только на ежедневное поведение и мироощущение горожан, но и на фундаментальные процессы становления гражданского общества.

Город возникает первоначально как специфический вид пространственной среды обитания человека, противопоставленный менее функционально развитой сельской среде. Высокая компактность, плотность освоения, коммуникационная насыщенность городского пространства, продиктованные первоначально нуждами обороны, а затем экономией затрат, являются основными характеристиками города. Город, по существу, представляет маленькую модель общества. В нем складывается особый тип социальных контактов на неформальной основе, который характеризуется высокой мобильностью, легкостью установления отношений, необычной широтой охвата и является одной из главных причин, притягивающих к городу все новые и новые массы населения. Не случайно именно город (сгусток социальной жизни) всегда был ареной важнейших экономических событий.

Город все в большей степени распространяет свое доминирующее влияние на окружение, втягивает в орбиту своих трудовых и потребительских связей все больше населения и тем самым объединяет в одно функционально-пространственное целое территории, совершенно различные по своим природным характеристикам, степени освоения и характеру использования.

Наконец, все больше усиливаются связи между отдельными городами. На основе межгородской транспортной сети формируются взаимосвязанные системы городов. Город выступает теперь как часть системы расселения, которой он принадлежит, как элемент единого процесса освоения и разумного использования пространства в масштабах региона (рис. 1.1). Важную роль в этом города определяет его исключительную «живучесть», которая проявляется в устойчивости к внешним возмущениям в условиях количественного роста и структурных преобразований городской территории.

Город выступает как часть системы расселения, которой он принадлежит, как элемент единого процесса освоения и разумного использования пространства в масштабах региона. Важную роль в этом процессе играет население. Активность населения существенно возрастает и распространяется на территорию, которая значительно превышает собственную городскую территорию. Этот процесс стимулируется современными тенденциями экономического развития, развитием новых информационных технологий, общим ростом уровня жизни. территорию, которая значительно превышает собственную городскую территорию. Этот процесс стимулируется современными тенденциями экономического развития, развитием новых информационных технологий, общим ростом уровня жизни.

Совершенствование транспорта также оказывает воздействие на рост города, на более тесное взаимодействие его с окружающей внешней средой. Увеличение скорости транспортных средств, улучшение их комфортности приводят к увеличению «зон тяготения», окружающих любой крупный город. Эти зоны, не являясь городской средой, фактически несут функциональную нагрузку, которая определяется городскими потребностями.

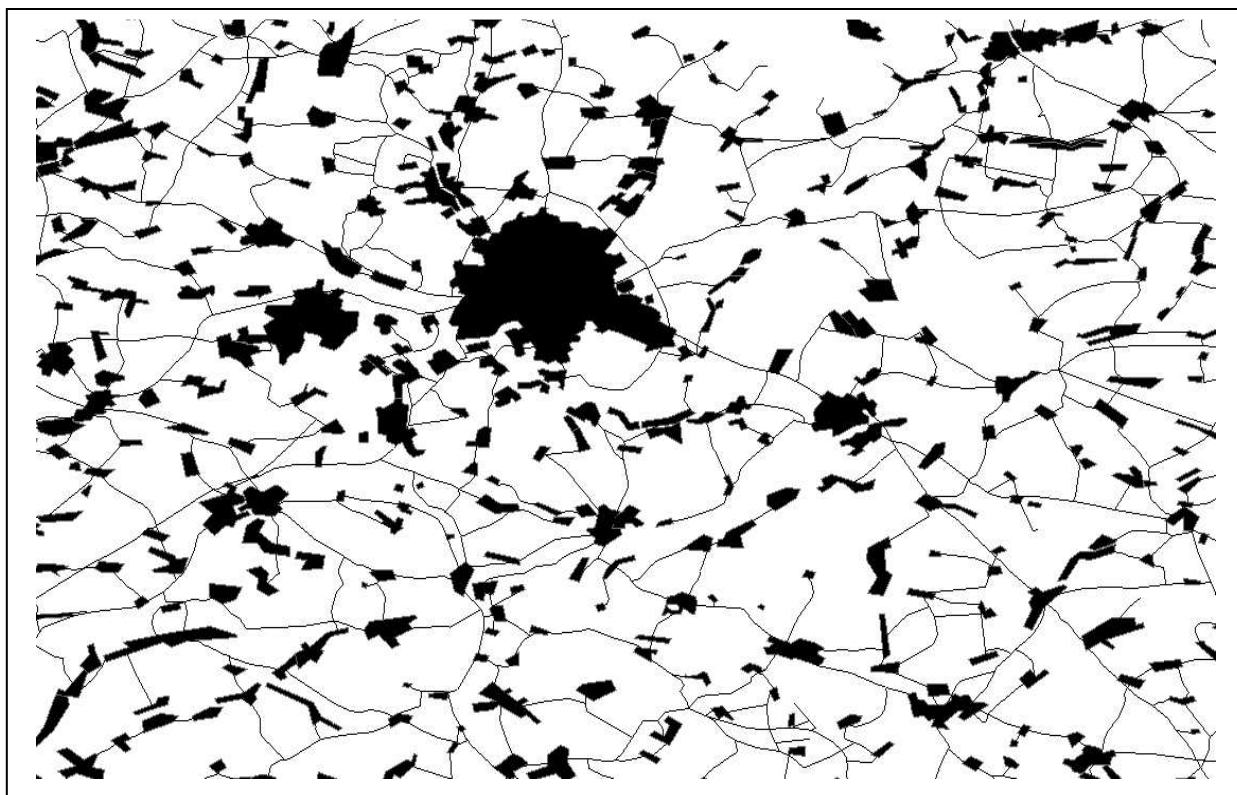


Рис. 1.1 – Фрагмент системы городов на основе межгородской транспортной сети

Все это свидетельствует о том, что рост крупных городов есть проявление некоторой исторической закономерности. Процесс роста

крупных городов не монотонный процесс. Различные катастрофические события, наступающие случайно, могут временно тормозить развитие города. Однако процесс урбанизации неизбежно ведет не только к увеличению размеров, но и к существенному усложнению всей функционально-пространственной организации города, то есть к росту «сложности» города.

Главная особенность «сложности» города – это вытягивание в орбиту внутригородских связей все более обширных территорий, которые получают специфическое городское использование; вместе с тем, для этих новых территорий часто характерна гораздо более низкая плотность освоения, чем в центральных, исторически сложившихся районах городов. Города устанавливают более тесное взаимодействие со своим сельским окружением. Фактические границы между городом и окружающими его территориями размываются.

Главными признаками такого распыленного расселения городского населения являются:

- резкое увеличение площади урбанизированных территорий;
- ленточный характер освоения территории;
- ежедневные «приливы» и «отливы» населения с периферии в центральное городское ядро, то есть «маятниковая миграция».

Маятниковая миграция – это частный случай расселения населения относительно мест приложения труда без перемены места жительства (живут в одном населенном пункте, работают или учатся в другом).

Маятниковая миграция уже давно привлекает внимание всех специалистов, изучающих режим функционирования развивающихся городских образований. Существует обширная научная литература по изучению регулярных трудовых перемещений городского населения. Маятниковая миграция – это не столько миграция, а скорее всего образ жизни, который предполагает повседневные загородные поездки, в принципе не отличающиеся от регулярного пользования внутригородским транспортом: подчас они отнимают не больше времени, чем поездки внутри города.

Маятниковые миграции населения являются главным определителем фактических границ зон влияния городов или того ареала, в пределах которого локализуются трудовые и социально-бытовые связи городского населения. Чаще всего этот ареал включает не только город-центр и тяготеющую к нему сельскую местность, но и целую систему взаимосвязанных поселений городского типа. Формирование таких скоплений городских

поселений, объединенных сложной системой связей, в настоящее время является главной чертой современной урбанизации. Такая система взаимосвязанных поселений городского типа получила название агломерации.

Агломерация является широко распространенной пространственной формой взаимодействия городских поселений. Обычно понятие городской агломерации связывается с группой близко расположенных городов, между которыми существуют устойчивые трудовые, культурно-бытовые и производственные связи.

Основной характеристикой города является его функционально-пространственная структура.

Динамический характер современного городского развития, быстрый территориальный рост города, его интеграция в систему взаимосвязанных населенных мест, усиление его внешних связей – все это обуславливает серьезные перестройки внутригородской организации. Учитывая динамический характер городского развития, преимущество получает гибкая планировочная структура, которая обеспечивает сохранение устойчивых связей между основными функциональными зонами в процессе роста города.

Гибкая структура противопоставляется статичной, замкнутой структуре, для которой характерно концентрическое территориальное развитие и связанное с этим рассредоточение строительных объектов.

Применение линейной планировочной схемы в современном градостроительстве ушло достаточно далеко от классических прототипов. Каждая такая полоса охватывает, как правило, весьма обширные территории, прилегающие к транспортным коммуникациям, среди которых основную роль играет трасса скоростного общественного транспорта или транспортные магистрали.

В последние десятилетия наблюдается интеграция в пространстве основных функций городской жизни. На протяжении длительного периода градостроители исходили из представления о четкой и последовательной дифференциации во времени и пространстве всех основных функциональных процессов, протекающих в городе – труда, быта, отдыха. Это нашло свое отражение в широко распространенной методике функционального зонирования территорий при составлении градостроительных планов.

Однако общие изменения в социально-экономической системе городов привели к тому, что все труднее локализовать систему мест приложения

труда в какой-либо определенной зоне города. Она охватывает и промышленные территории, и общегородской центр, и жилые районы города, и даже рекреационные территории, поскольку и те и другие быстро насыщаются сетью учреждений обслуживания. Система мест приложения труда оказывается как бы «размазанной» по всему городу, что служит очевидным проявлением процессов функционально-пространственной интеграции.

Процесс пространственной интеграции городских функций можно наблюдать сегодня в самых различных по размеру, положению в системе расселения и градостроительной специфике городах, причем повсюду он обнаруживает все возрастающую активность. Этот процесс может иметь важные последствия в разных областях городской жизни.

Общая направленность функциональной интеграции города заключена в преодолении разобщенности его частей, в попытке вернуть городской среде утраченные ею качества целостности и полноты, насыщенности тесно переплетенными во времени и пространстве жизненными процессами.

В условиях все возрастающей интеграции городской жизни в основу формирования планировочной структуры города должен быть положен более широкий и гибкий принцип, чем функциональное зонирование в его традиционном понимании. Это означает, что дифференциация элементов планировочной структуры должна осуществляться исходя из более широкой, чем сейчас, трактовки понятия «функция», которая не сводится к определению доминирующего на данной территории типа деятельности и предполагает обобщенную характеристику процессов городской жизни.

Для этой цели могут быть использованы признаки, которые позволяли бы агрегировать процессы, различные по своему внутреннему содержанию, но сходные по тем требованиям, которые они предъявляют к организации пространства, и противопоставить их другим, резко отличающимся в этом отношении процессам.

1.2 Определение городской системы

Изучение города с позиций системного подхода начинается с определения места, которое он занимает в рамках общей иерархии пространственно-планировочных систем, формирующих жизненную среду человека. Во множестве таких систем могут быть объективно выявлены три иерархически взаимосвязанных уровня, которые в общих чертах соответствуют трем исторически сложившимся областям практической и

проектно-строительной деятельности человека в области организации жизненной среды:

- архитектуре;
- градостроительству;
- районной планировке.

Такая общая модель иерархии пространственно-планировочных систем может быть описана в терминах системных представлений. На каждом уровне иерархии основной объект исследования и проектирования определяется как система, которая состоит из функционально-однородных подсистем, соединенных системообразующими связями, и может быть охарактеризована определенными пространственно-временными параметрами.

Первый уровень. Городская среда формируется сооружениями. Однако несмотря на то, что сооружение традиционно всегда было основным объектом профессиональной деятельности архитектора, само по себе, взятое в отдельности, вне связей с другими сооружениями, оно не определяет тип среды, ее состояние или изменение. Принципиальными для изучения города на этом уровне являются не столько собственно городские сооружения, сколько тип их пространственной взаимосвязи, тем более, что в современных условиях отдельное сооружение все больше теряет свою замкнутость.

Поэтому на уровне городской среды в качестве основного объекта исследования целесообразно рассматривать не отдельное сооружение, а относительно обособленный участок среды, то есть взаимосвязанный комплекс сооружений и городских пространств, образующий архитектурно-планировочную систему (АПС). Такой комплекс может сформироваться на основе стилового единства, общности ландшафтных характеристик или специфики функционального использования, он всегда характеризуется определенной мерой пространственной целостности и функциональной связанности. Любой достаточно большой участок города естественно распадается на отдельные архитектурно-планировочные системы. В качестве АПС можно рассматривать общественный центр жилого района, городскую застройку в пределах междомагистральной территории, городской парк и так далее.

Элементами АПС являются отдельные сооружения, относительно обособленные участки открытых пространств, создающие необходимые условия для различных форм социальной активности человека. Реальные функционально-пространственные связи, на основе которых эти элементы

объединяются в АПС, формируют ее элементарную структуру. Так, конфигурация улиц, площадей и других свободных участков определяет строение городской среды, а внутренняя коммуникационная распределительная сеть определяет строение крупного сооружения.

Следует специально подчеркнуть, что АПС предполагает высокую степень связанности составляющих ее элементов безотносительно к тому, принадлежат ли они одному сооружению или находятся в открытом пространстве. Точно так же архитектурным ансамблем принято называть некоторое композиционное единство безотносительно к тому, представляет ли это пространство из себя один сложно дифференцированный архитектурный объект или несколько объектов, взаимосвязанных в пространстве.

АПС представляет собой «элемент» городской среды, которая потребляется человеком целиком и непрерывно. Поэтому масштаб размеров АПС определяется возможностями неустомительного пешеходного передвижения, на основе которого реализуются формирующие систему функциональные связи.

Второй уровень. В качестве элементов здесь выступают отдельные АПС. Система этого уровня представляет собой их взаимосвязанное единство, то есть единство городских объектов и территорий, в рамках которого реализуется комплекс основных социальных потребностей населения. Внутренняя целостность системы такого типа определяется наличием устойчивых и регулярных трудовых и культурно-бытовых связей населения. Это свойство позволяет характеризовать ее как «градостроительную систему» (ГС). Важную роль в реализации функциональных связей играет городской транспорт. Пространственная структура ГС находит отражение в трассировке главных транспортных магистралей, в размещении важнейших транспортно-коммуникационных узлов. Размеры и реальные границы ГС определяются величиной предельно допустимых затрат времени на регулярные внутренние сообщения. В рамках суточного цикла эта величина, как правило, составляет не более одного часа на поездку в одном направлении.

Третий уровень. На этом уровне, который можно охарактеризовать как уровень городских скоплений, городские системы выступают как взаимодействующие элементы. Важнейшим условием этого взаимодействия является поддержание общего экологического баланса, развитие экономики на основе замкнутых производственных циклов, обеспечивающих рацио-

нальное потребление природного сырья, утилизацию и очистку промышленных отходов, защиту и восстановление природного окружения. Эти проблемы могут быть эффективно решены только в рамках региона, имеющего «необходимую сырьевую и энергетическую базу, людские, материальные и территориальные ресурсы, достаточные для создания устойчивого баланса производства и потребления, определяющего известную его автономию в рамках «национальной или глобальной экономической системы». Такой объект, будем называть региональной системой (РС).

Системообразующими для РС являются транспортные, информационные и энергетические связи, обеспечивающие регулирование и управление функционированием и развитием относительно обособленной части крупного региона или страны. Особое положение в структуре РС занимают пересечения магистральных коммуникаций, где размещаются главные административно-управленческие, культурно-образовательные и другие центры.

Намеченная иерархия пространственной организации среды обитания человека охватывает все многообразие явлений, которое заключается в понятии «город». На уровне архитектурно-планировочных систем на первый план выступают локальные функционально-пространственные связи, обеспечивающие целостность того или иного участка городской среды. На втором уровне город рассматривается преимущественно как средоточие жизнедеятельности населения, как генератор специфического городского образа жизни. Наконец, на третьем уровне город выступает как форма территориального освоения и важнейший фактор экономической активности общества.

1.3 Эволюция градостроительной системы и развитие геопространственной среды

Понятие «урбанизированные территории» включает в себя совокупность элементов (объектов) системы расселения, для которых характерны следующие свойства:

- профессиональные занятия населения в большинстве или в подавляющем большинстве не связаны с сельскохозяйственными работами;
- наблюдается высокая концентрация обмена информацией, кооперации людей в их деятельности, направленной к выгодному

использованию материальной среды в целях благоустройства данного объекта и социального благосостояния населения;

- существует высокоэффективное производство за счет интенсивного разделения труда;

- существует внутренняя целостность этих объектов, обусловленная устойчивыми социально-функциональными связями значительного по численности населения;

- высока интенсивность общественных форм жизни.

В современных условиях эти свойства, характерные ранее только для города, все больше распространяются на обширные территории, которые невозможно отождествить с представлением о компактном, пространственно обособленном от своего окружения населенном пункте, которое было изначально положено в основу термина «город».

Тогда под понятием «развитие города» будем называть состояние, при котором количество единиц жилья и его общая площадь, а также объем услуг увеличиваются быстрее, чем количество жителей и общее количество рабочих мест. Комфортность проживания в таком городе возрастает, что вызывает переезд в него все новых и новых жителей.

Под «ростом города» будем понимать состояние, когда количество жителей и рабочих мест растет быстрее, чем количество единиц жилья и объем предоставляемых общественных благ. Город становится все менее удобен для жизни, но все еще притягателен для переезда в него (хотя бы наличием высокооплачиваемых рабочих мест на новых предприятиях).

Основные отличительные особенности урбанизированной территории с позиций системного подхода:

- урбанизированная территория – это открытая, сложная, иерархическая общественно-экономическая система, реагирующая перестройкой своей структуры и функций на изменение внешних материальных, энергетических и информационных потоков;

- сообщество урбанизированной территории – это целеустремленная система, в которой принципы социального партнерства и приверженность эволюционному пути развития являются основой диалога власти и общественности в поисках эффективных путей выхода на процессы самоорганизации.

Градостроительное развитие можно гипотетически представить как физическое увеличение территории и вместе с тем перераспределение функциональной специализации территории города. В начале происходят

изменения на физическом уровне (например, переход от незастроенных территорий к застроенным), затем происходят изменения на функциональном уровне (изменение социальной и деловой активности), которая выражается в изменении видов разрешенного использования земельных участков. Иллюстрация различных видов социальной и деловой активности населения представлена на рис. 1.2 [10].



Рис. 1.2 – Иллюстрация к понятию социальной и деловой активности в городе

Таким образом, физическое увеличение и деловая активность на территории являются основными элементами любой градостроительной системы, которая исследуется с точки зрения ее развития.

На рис. 1.3 показана упрощенная схема процесса развития градостроительной системы и систем, которые оказывают влияние на этот процесс.

В литературе [4 , 5 , 7 ,10, 13] предполагается, что процесс развития возникает в период времени $(t_1 - t_2)$, который в литературе называется этапом бифуркации градостроительной системы и тесно связан с существующими системами P , U и N . Система U сама представляет собой социо-экономическую систему, которая является источником роста городской активности на момент времени t_1 (первая точка бифуркации). В

этот момент времени концентрация деловой активности превышает пространственную составляющую процесса развития градостроительной системы.

Система N представляет собой метасистему, состоящую из физической и экологической систем, которые состоят из таких элементов: как гидрология, ландшафт, транспортная сеть, инженерная инфраструктура, схемы использования земель, в том числе рекреационные зоны и сельскохозяйственные земли. Рассматриваемая система N обеспечивает наличие или отсутствие потенциала для инициализации будущего процесса развития.

Система P представляет систему планирования и прогнозирования развития градостроительной системы на концептуальном уровне, которая разрабатывает, проектирует и реализует схемы пространственного планирования территорий. Основная задача этой системы – выполнение подготовки городского пространства и распределение функциональных зон по территории с целью обеспечения устойчивого, закономерного развития градостроительной системы.

Например, рис. 1.3 иллюстрирует процесс развития, то есть преобразование территории на интервале бифуркации между t_1 и t_2 состоит в том, что рассматриваемая территория становится частью системы U , после точки бифуркации t_2 , выходя из метасистемы N в момент бифуркации t_1 . Согласно такому предположению, процесс развития градостроительной системы G может быть представлен как система, которая возникает в результате сложного взаимодействия между тремя системами (P , U и N).

Тонкие стрелки на рис. 1.3 отображают взаимодействие между этими тремя системами, толстые стрелки отображают обеспечение, то есть содействие процессу развития градостроительной системы со стороны рассматриваемых трех систем P , U и N .

Система P вносит управляющее воздействие в процесс развития и определяет требования к системе G в целом; система N вносит в процесс развития свой вклад в виде территориального образования, которое имеет высокий потенциал, в то время как система U является носителем деловой активности на городской территории, которая является стимулирующим фактором в развитии градостроительной системы.

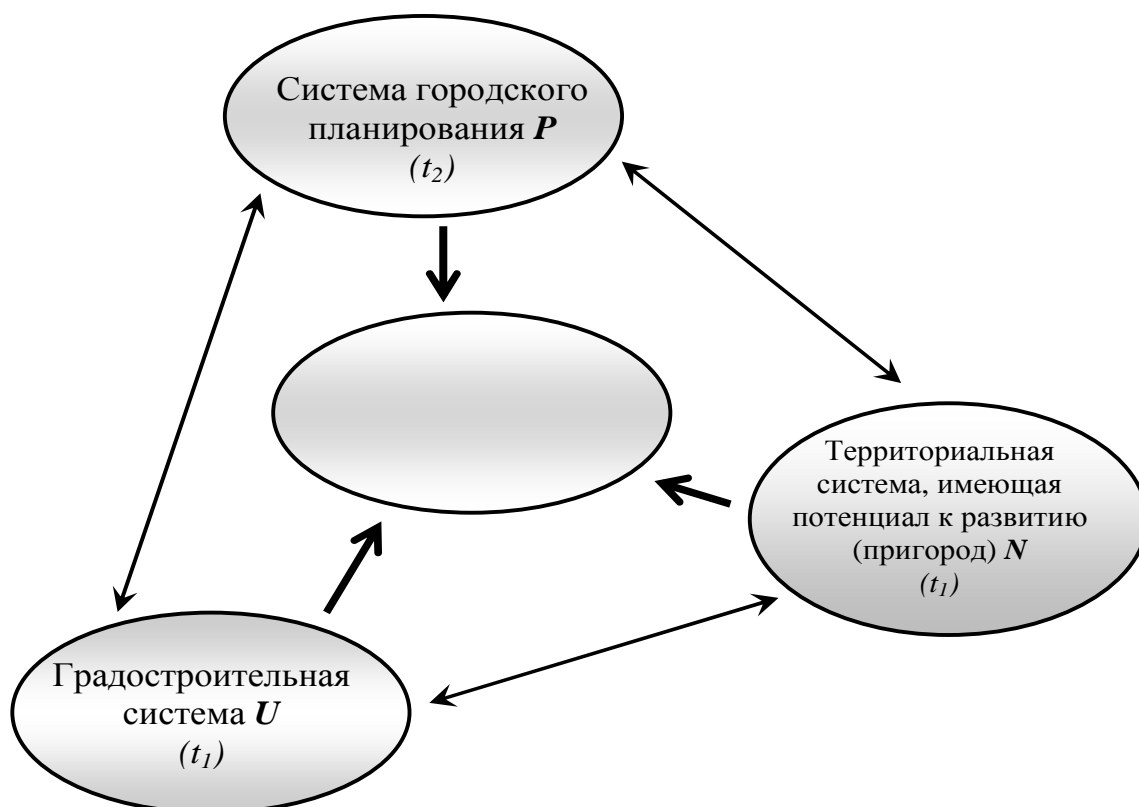


Рис. 1.3 – Процесс развития градостроительной системы как результат взаимодействия систем

Ключом к пониманию механизма возникновения процесса развития является понимание динамики взаимодействия рассматриваемых сложных систем. В терминах физики, система U проявляет себя как «тянущая сила», воздействующая на систему G , и обеспечивает социально-экономическую активность на определенной территории. Наоборот, система N приводит в действие «толкающие силы» для системы G . Следовательно, система G является результатом взаимодействия процессов. Такое взаимодействие является открытым, нелинейным, динамичным и таким образом можно отметить, что развитие градостроительной системы можно отнести к самоорганизующейся системе [11].

Таким образом, модель, представленная на рис. 1.3, достаточно хорошо объясняет динамику развития градостроительной системы на исторически коротких отрезках времени.

На рис. 1.4 показаны схемы развития градостроительных систем для а) Лондона и б) Берлина.

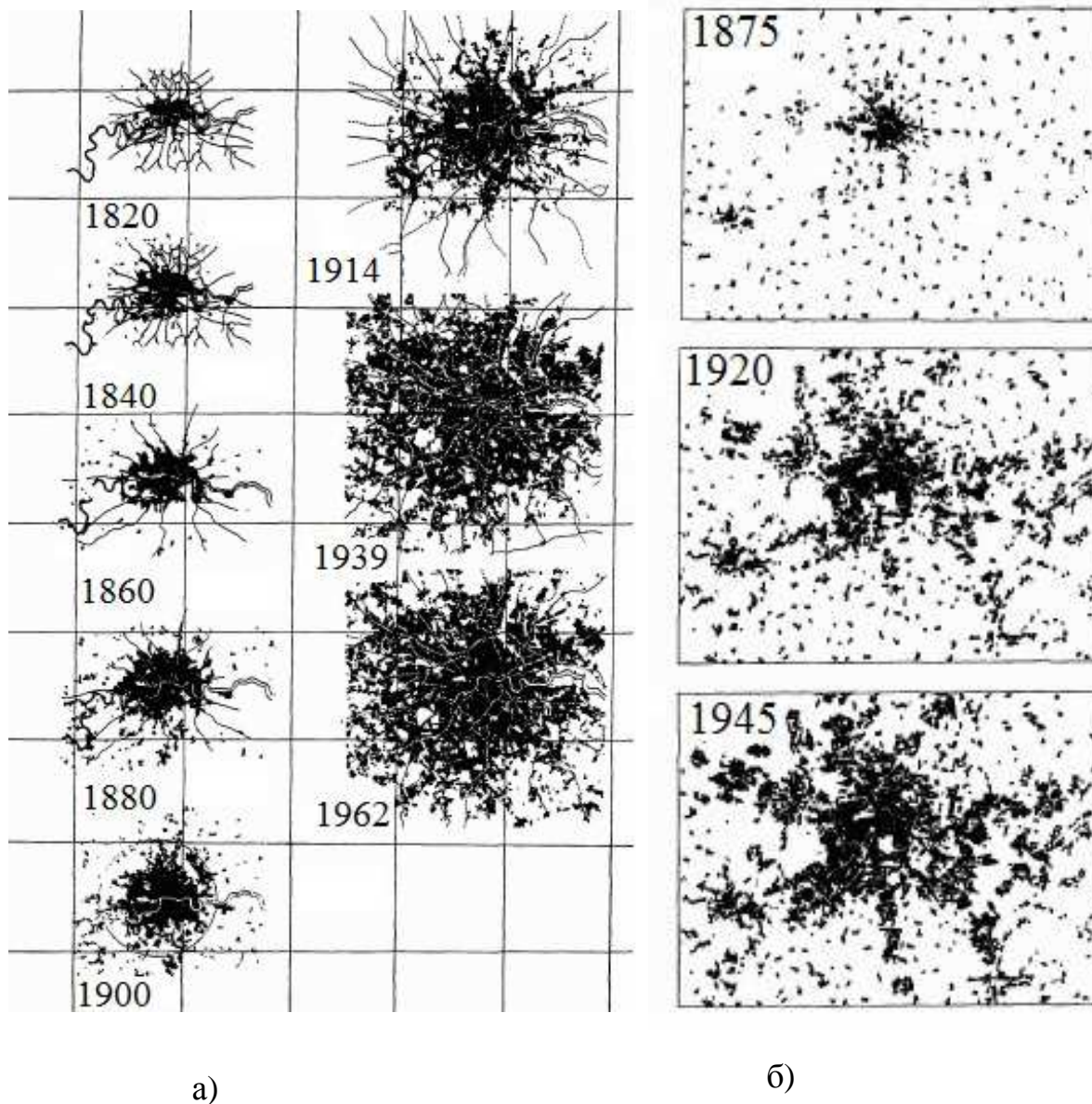


Рис. 1.4 – Пример развития градостроительных систем:
а) Лондона и б) Берлина

На рис. 1.5 показан пример развития градостроительной системы Харькова в пространстве и времени, которое охватывает временной период с 1895 по 2003 годы. Наиболее интенсивный рост города происходил в период индустриализации промышленности в советский период и территориальный рост города распространялся на незастроенные территории вдоль основных магистралей в направлении запад-восток и север-юг.

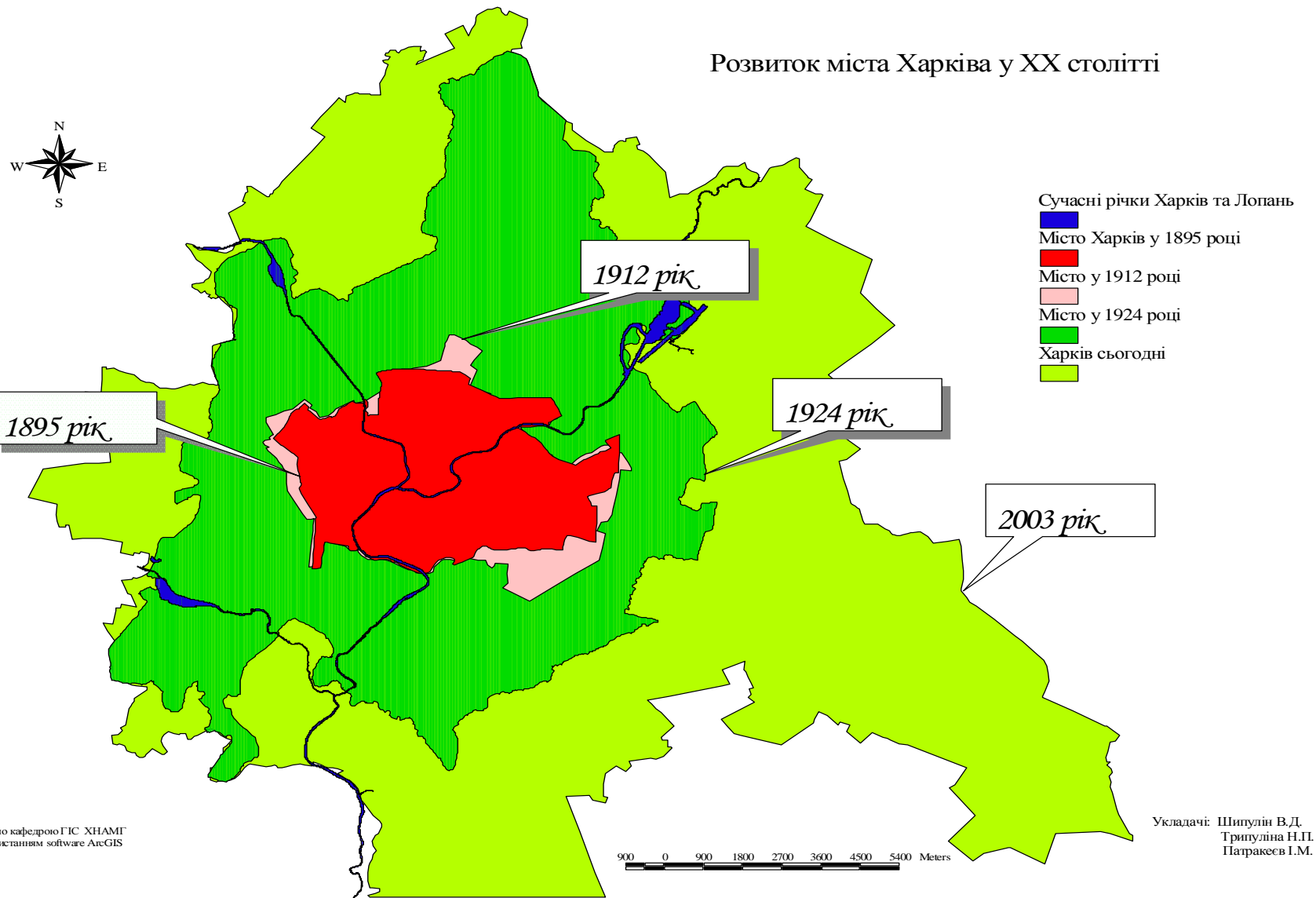


Рис. 1.5 – Пример развития градостроительной системы Харькова с 1895 по 2003 год

Особое значение имеет понимание в изучении процесса развития градостроительной системы является понятие «пространства». В математике пространство определяется как «логически мыслимая форма (или структура), служащая средой, в которую конвертируются другие формы и те или иные конструкции». В математике применяются термины «эвклидово», «гильбертово», «римановское»; «векторное», «функциональное», «топологическое»; «метрическое», «фазовое», «пространство событий» и др.

Во всех случаях пространство оказывается виртуальной конструкцией, которая создается в целях построения определенной концепции, теории для организации представлений, на основе которых могут выстраиваться социальная практика.

Инструментом освоения пространства выступают географические образы (образы геопространства) – устойчивые пространственные представления, которые формируются в результате человеческой деятельности. Они являются, как правило, моделями определенного географического пространства, которые создаются для более эффективного достижения какой-либо поставленной цели.

Качество таких моделей влияет на эффективность управления геопространством и территорией в целом, в том числе и на градостроительную систему.

В настоящее время сформировались новые подходы к пониманию пространства как геопространства. *Геопространство* – это географическая оболочка Земли, подлежащая отображению, моделированию территориальной локализации в определенные периоды времени, объектового состава, перечня и степени подробности геоинформации, указанных потребителем [4, 6, 7]. Основным критерием, ограничивающим включение пространств в понятие «географического», является применимость для их изучения и моделирования координатных систем: географических и геодезических.

Геопространство, как разновидность пространства, характеризуется протяженностью, динамичностью, структурностью, непрерывностью, конвертированностью.

Протяженность геопространства характеризуется территориальным охватом страны, единиц административно-территориального деления, населенного пункта.

Динамичность геопространства обусловлена его изменчивостью и неразрывной связью со временем. Это обстоятельство, с одной стороны, позволяет сообщать как о прошлом состоянии рассматриваемого пространства, так и о будущем (в виде, прогноза).

Структурность геопространства проявляется в наличии и расположении объектов геопространства, в том числе, явлений и процессов, содержащихся и происходящих в геопространстве на каждый конкретный момент времени. Примерами процессов, происходящих в геопространстве, являются: наводнения, распространение болезней, загрязнение окружающей среды, военные операции, демографические процессы, развитие градостроительных систем.

Объекты геопространства могут быть конкретными (например, улично-дорожная сеть, инженерная инфраструктура, ландшафт) и абстрактными (плотность населения), реальными (гидросистема) и предполагаемыми (проектируемая многоэтажная застройка).

Непрерывность геопространства характеризуется неперенным наличием в каждой его точке какого-нибудь объекта геопространства; не существует «пустого» геопространства. Тем не менее, геопространство существует в нескольких измерениях, в том числе в физическом и виртуальном.

Конвертируемость геопространства – это возможность виртуальной трансформации из одного геопространства в другое. В этом заключается одно из фундаментальных свойств геопространства как разновидности киберпространства.

Для целей управления территориями необходимо иметь возможность локализовывать геопространственные данные. С этой целью созданы системы, где применяется понятие инфраструктура пространственных данных (ИПД). Это понятие широко используется на разных уровнях управления градостроительными системами, а также в географии, картографии, геоинформатике и в других дисциплинах. Инфраструктуру пространственных данных можно определить как систему, обеспечивающую взаимодействие лиц, использующих в своей работе различные цифровые пространственные данные, а также как единую среду, обеспечивающую поиск, публикацию и обмен разнообразными геоинформационными ресурсами.

Национальная ИПД (NSDI – англ.) позволяет сформировать систему для доступа к базовым пространственным данным, покрывающим ту или

иную территорию. Эта ИПД в полной мере встраивается в систему государственного территориального управления.

Выводы

Анализ градостроительной системы, ее особенностей, позволяет исследовать механизм развития такой сложной системы в пространстве и времени.

Проведенный анализ свидетельствует о том, что рост крупных городов есть проявление некоторой исторической закономерности. Процесс роста крупных городов не монотонный процесс. Различные катастрофические события, наступающие случайно, могут временно тормозить развитие города. Однако процесс урбанизации неизбежно ведет не только к увеличению размеров, но и к существенному усложнению всей функционально-пространственной организации города, то есть к росту «сложности» города. Главная особенность «сложности» города – это втягивание в орбиту внутригородских связей все более обширных территорий, которые получают специфическое городское использование, вместе с тем, для этих новых территорий часто характерна гораздо более низкая плотность освоения, чем в центральных, исторически сложившихся районах городов. Города устанавливают более тесное взаимодействие со своим сельским окружением. Фактические границы между городом и окружающими его территориями размываются.

Процесс развития градостроительной системы, как результат взаимодействия систем, представляет собой социо-экономическую систему, которая является источником роста городской активности на момент времени t_1 (первая точка бифуркации). В этот момент времени концентрация деловой активности превышает пространственную составляющую процесса развития градостроительной системы. Система N представляет собой метасистему, состоящую из физической и экологической систем, которые состоят из таких элементов, как: гидрология, ландшафт, транспортная сеть, инженерная инфраструктура, схемы использования земельных ресурсов в том числе рекреационных зон, сельскохозяйственные земли. Рассматриваемая система N обеспечивает наличие или отсутствие потенциала для инициализации будущего процесса развития.

2. НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ В РАЗВИТИИ ГОРОДСКИХ ОБРАЗОВАНИЙ

Чем сложнее система, тем менее мы способны дать точные и в то же время имеющие практическое значение суждения о ее поведении. Для систем, сложность которых превосходит некоторый пороговый уровень, точность и смысл становятся почти исключаяющими друг друга характеристиками.

Л. Заде

Неопределенность – одно из центральных понятий в современной теории и практике управления. Важность этого понятия обусловлена тем, что на деятельность любой организации влияют неопределенные факторы. К ним относятся такие факторы внешней и внутренней среды, значения которых неизвестны или известны не полностью. Несмотря на дефицит информации, возможное влияние неопределенных факторов на организацию должно учитываться в процессах принятия управленческих решений. Если это происходит, то говорят о принятии решений в условиях неопределенности.

В общем случае неопределенность в моделях принятия решений следует понимать как наличие нескольких возможных исходов каждой альтернативы. Действительно, в обыденном понимании неопределенность обычно связывается с такими характеристиками, как непредсказуемость, случайность, неоднозначность, нечеткость. Если факторы, влияющие на принятие решения, обладают этими свойствами, то нельзя говорить о каком-либо определенном исходе альтернативы. В этих условиях необходимо рассматривать все возможные исходы или хотя бы наиболее вероятные из них.

2.1 Источники неопределенности в управлении развитием города

Городская система представляет собой сложный синтез как природных факторов, так и материальных объектов, созданных человеком. Связи между ними очень многообразны и в процессе активного развития претерпевают изменения, причем такие, которые невозможно предвидеть на основе ретроспективного анализа. Неопределенность, недетерминированность в эволюции городской системы являются ее естественным качеством, которое необходимо учитывать при решении любых проблем управления ее развитием.

Для успешного решения таких проблем необходимо разобраться в источниках неопределенности и подобрать подходящие модели с помощью которых можно принимать адекватные управленческие решения.

Городская система является частью системы расселения более высокого уровня: региональной, национальной, глобальной. В связи с этим проявление неопределенности в развитии градостроительной системы можно разделить на две группы (рис. 2.1).

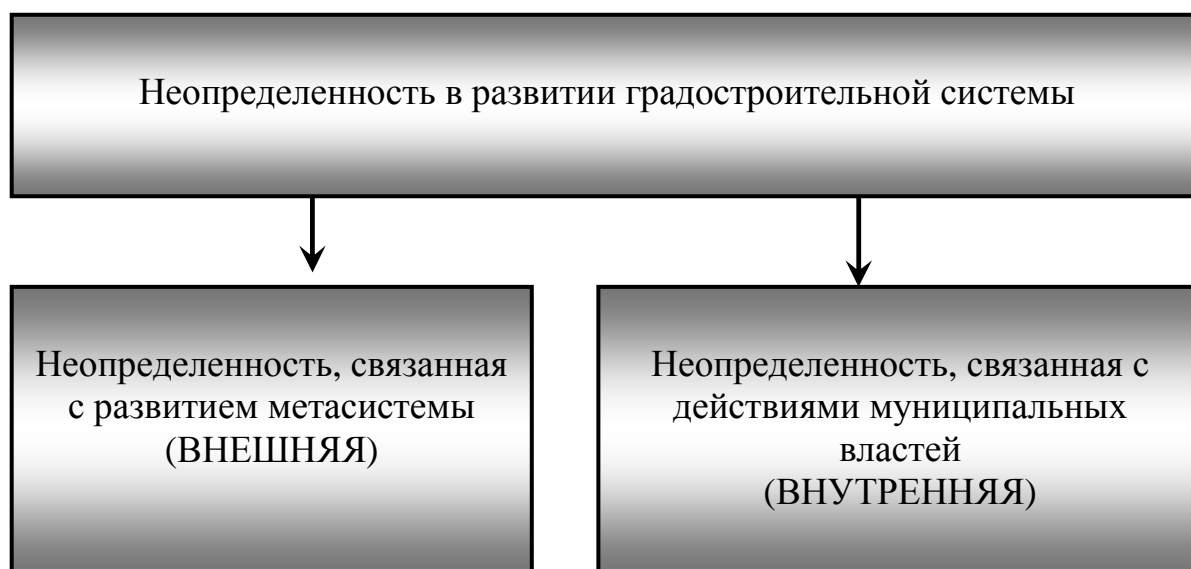


Рис. 2.1 – Основные группы неопределенности, влияющие на процесс развития градостроительной системы

К первой группе относится неопределенность, которая возникает в развитии метасистемы (региональной, национальной, глобальной), и проявляется в развитии городской системы. Город – не изолированная

система, а система, которая активно взаимодействует с внешним окружением своими материальными, информационными, финансовыми, трудовыми и другими ресурсами.

Общее социально-экономическое состояние метасистемы оказывает существенное влияние на состояние города и его эволюцию во времени. Например, при переходе метасистемы от одного типа экономических отношений к другому сопровождается высоким уровнем нестабильности.

Это затрудняет возможность более или менее надежного прогнозирования основных тенденций развития метасистемы, которые определяют эволюцию городских процессов.

В результате городская система развивается хаотично, оперативно реагируя на воздействия внешней среды. В таких условиях не может быть речи о стратегическом и даже тактическом планировании городской перспективы.

Другая группа факторов неопределенности возникает внутри самой городской системы. Эта группа факторов связана с действиями городских властей, с какими-либо непредвиденными ситуациями, которые вызваны обычно несовершенством законодательства, со сложностью самой городской системы, невозможностью установить причинно-следственные связи между городскими подсистемами и др. Кроме того, одним из источников внутренней неопределенности является так называемый поведенческий фактор.

Характерной чертой рыночной экономики является большое количество участников процесса развития города, которые обладают определенной свободой в выборе собственных стратегий. Поведение людей, их мотивации в принятии тех или иных решений, уровень целесообразности этих мотиваций часто неопределенны.

Хотя результат проявления обеих групп факторов одинаков, механизмы их реализации существенно отличаются. Если использовать системную терминологию, то первая группа факторов неопределенности имеет дело с внешним воздействием и механизмом влияния этого воздействия на городскую систему, вторая группа факторов имеет дело с неопределенными внутренними параметрами и механизмами их влияния на состояние городской системы.

2.2 Три основные модели неопределенности

Неопределенность, порождаемая как внешними, так и внутренними факторами, проявляется в неполноте или неточности информации об условиях функционирования городской системы, связях между ее подсистемами, характеристиками этих подсистем и так далее. Неопределенность обычно связывается с недостоверностью информации или о текущем состоянии городской системы, или о прогнозе ее состоянии в будущем.

Связь между информацией и неопределенностью необходимо описать количественными характеристиками и выбрать пригодную модель для оценки текущего состояния городской системы или прогнозирования ее состояния.

В литературе рассматриваются три основные модели неопределенности (рис. 2.2) [10].

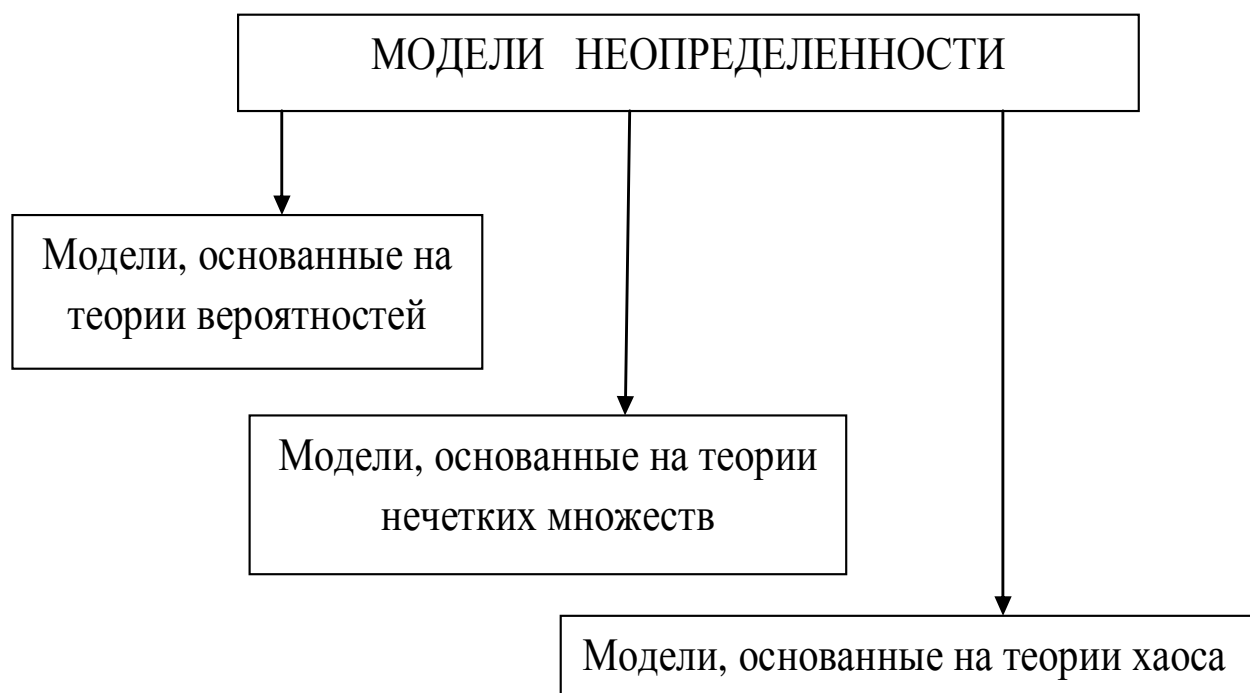


Рис. 2.2 – Основные модели неопределенности

Наиболее распространенная модель неопределенности – вероятностная. В рамках этой модели предполагается, что факторам внешней и внутренней неопределенности можно приписать некоторую вероятность их реализации или достоверности. В таком случае последующий учет неопределенности может быть выполнен известными в теории вероятностей и математической статистики методами.

Особенностью такой распространенной модели неопределенности является то, что классическое понятие вероятности относится к массовым, повторяющимся в одинаковых условиях событиям.

Подробно применение вероятностной модели неопределенности для управления и прогнозирования развитием города изложено в работах [1,2,3].

Вторая модель неопределенности основана на теории «размытых объектов». Под объектами можно понимать множества, высказывания, величины и так далее. Основным понятием в моделях основанных теории «размытых объектов» является «функция принадлежности». Функция принадлежности является характеристикой того, насколько тот или иной объект (высказывание, величина и тому подобное) принадлежит определенному классу. Функция принадлежности, как и вероятность, изменяется в интервале $[0,1]$. В теории «размытых» объектов функция принадлежности задается аксиоматически, а при решении практических задач задается экспертами.

К третьей модели неопределенности относится модель, основанная на гипотезе о том, что неопределенность порождается динамической системой специального вида. Такая динамическая система генерирует хаотический процесс. Для таких процессов вводится аналог функции распределения вероятности и затем оперируют с функцией не обращая внимания на отсутствие массовости в изучаемом событии [4, 5].

В дальнейшем в монографии в основном будет использоваться нечеткомножественная модель неопределенности.

Переход от централизованной к рыночной экономике сопровождается высоким уровнем нестабильности и неопределенности в протекании процессов в обществе, которые влияют на городское развитие. Необходимо отметить, что уровень изменчивости окружающей среды довольно высокий, в связи с чем город подвержен частым возмущающим воздействиям, которые неизбежно отражаются на его развитии. Однако, с другой стороны, город достаточно консервативное пространственное образование, которое являясь элементом метасистемы, эволюционирует достаточно медленно.

Как в первом, так и во втором процессе присутствуют факторы неопределенности. Но если в первом процессе необходимо реагировать достаточно оперативно, то во втором необходимо использовать собственную инерцию города.

Применение различных моделей неопределенности позволяют оценивать текущее состояние городской системы, генерировать решения, сочетающие достаточно быструю адаптацию к нестабильности метасистемы, с отслеживанием определенных стратегических целей [25].

Необходимо отметить, что в настоящее время в литературе [5, 10,15] отмечается важность перехода от принципов «управления» развития города, что присуще централизованной экономике, к принципам «регулирования». Инструменты управления – это реальные материальные потоки из централизованных источников, в то время как «регулирование» предполагает создание «правил поведения» для всех участников процесса развития города. В соответствии с этими «правилами поведения» участники процесса сами должны находить материальные потоки, необходимые для развития города.

2.3 Особенности городской системы как объекта моделирования

Город представляет собой сложную динамическую систему. Процессы, происходящие в этой сложной динамической системе – это следствие как естественных внутренних взаимодействий между его элементами, так и внешних влияний в виде программ городского развития. Кроме того, город – не изолированная замкнутая система. Он активно взаимодействует с окружающей средой, потребляя из нее необходимые ресурсы и предоставляя ей продукты своего функционирования. Существенное влияние на процессы городского развития оказывает население, участвующее в городской деятельности. Его социальные, демографические, психологические, профессиональные и другие характеристики часто определяют формирование фактической городской среды. Город представляет собой многофункциональную систему и при этом весьма неоднородную, что обусловлено компактностью территории, на которой располагаются объекты с весьма разным функциональным назначением. Это жилые дома, промышленные предприятия, транспортные объекты, парки, заповедные зоны и инженерные объекты городского хозяйства. Поэтому город характеризует множество различных факторов, описывающих экономические, пространственные, экологические, социально-демографические, технические и другие явления, происходящие в городской системе.

И так же, как в любой неоднородной среде, наиболее важные свойства городской системы обнаруживаются во взаимодействии явлений. Причем

наиболее существенными для понимания и управления городским развитием оказываются те, которые не наблюдаются ни в одном из перечисленных явлений и проявляются только как результат их взаимодействий.

Все это, в целом, делает город весьма специфическим и трудным объектом для исследования. Механизмы происходящих процессов, внутренние их стимулы, характер взаимодействий между городскими компонентами столь сложны, разнообразны по своей природе, нестабильны, а иногда и случайны, что часто возникают значительные препятствия даже на начальном этапе исследования — определении состава переменных, которые характеризуют состояние городской системы, декомпозиции ее на блоки и выявлении причинно-следственных связей между ними.

Известно, что блоки можно рассматривать как одноэлементные объекты, то есть как нечто целостное, так и как многоэлементные объекты. В первом случае построение мотивированной модели такого блока, а также выявление связей с моделями других блоков затруднено. Но если удастся преодолеть эти трудности, то, как правило, получается довольно простая модель, которая может описывать поведение блока в очень агрегированных координатах. Во втором случае, наоборот, мотивированная модель блока возникает из простых форм индивидуального поведения элементов автоматически, что делает этот путь предпочтительным.

Выше уже отмечалось, что поведение каждого элемента в значительной степени случайно, тогда как объединенные в агрегаты элементы менее подвержены случайным воздействиям. Итак, при моделировании и структурном анализе городской системы, то есть ее функционально-пространственной организации, возникают два уровня описания — элементарный, стохастический и агрегированный, детерминированный.

Следует отметить, что с точки зрения общей теории систем, город представляет собой весьма нетривиальный объект: он принадлежит к стохастическо-детерминированным системам. Как правило, модель городской системы и модели всех составляющих ее подсистем обладают двухслойной конструкцией, т. е. модель каждой подсистемы имеет микро- и макроуровень. Другая особенность прослеживается при построении модели системы как совокупности подсистем. Она связана с тем, что городские подсистемы могут быть упорядочены лишь в некотором стохастическом

смысле, т.е. они образуют ансамбль иерархических цепочек, которые реализуются с определенными вероятностями.

Перечисленные особенности являются тем теоретическим фундаментом функционально-пространственной модели городской системы.

Для формализованного описания этих качеств рассмотрим городскую систему, понимая под термином «система» соединение каких-либо блоков с указанием их входов и выходов. В такой интерпретации понятия системы каждый из блоков осуществляет преобразование того, что действует на его входе, в то, что оказывается на выходе. Существенна в этом преобразовании его связь со временем и пространством.

Временные и пространственные факторы выступают в качестве основных аргументов для процессов, возникающих в городской системе, и определяют ее пространственную динамику. Под пространственными факторами обычно понимается набор параметров, характеризующих элемент городской территории. Для этого используют экономические, экологические, технические, геологические и другие показатели. Поэтому в общем случае городское пространство имеет несколько измерений, что свидетельствует о его неоднородности.

Определение и описание входных и выходных процессов основано на выявлении причинно-следственных связей. Процедура анализа факторов, характеризующих городскую систему, в значительной степени феноменологична и зависит от того, каковы цели исследования, каков набор исследуемых факторов, какой группе факторов отдается предпочтение и т. д. Однако существуют некоторые общие рекомендации, которых следует придерживаться при формировании множеств входных и выходных переменных.

В качестве входных переменных обычно выступают всевозможные планы и программы развития городов: генеральный план, план капитального строительства, программа социального и экономического развития и т. д. Перечисленное и есть то, с помощью чего можно целенаправленно управлять городскими процессами, влиять на развитие города. Однако, к входным переменным относятся также те, которые влияют на состояние городской системы, но являются недоступными для целенаправленного изменения.

К ним относятся воздействия со стороны внешней среды, окружающей городскую систему. Это могут быть природно-экологические, материально-технические, демографические и другие факторы, связанные с

городом, потому что город представляет собой часть системы более высокого уровня: региональной, национальной, глобальной.

Все остальные факторы, характеризующие город, относятся к классу выходных переменных. Таким образом, городская система (рис. 2.3) осуществляет преобразование двух типов входных процессов: программ развития $V_c(t, x)$ и воздействий внешней среды $V_d(t, x)$ в выходной процесс $E(t, x)$. Эти процессы являются функциями времени $t \in T$ и пространственной переменной $x \in X$, где T — интервал времени на котором рассматривается динамика городской системы и X — городское пространство (территория).

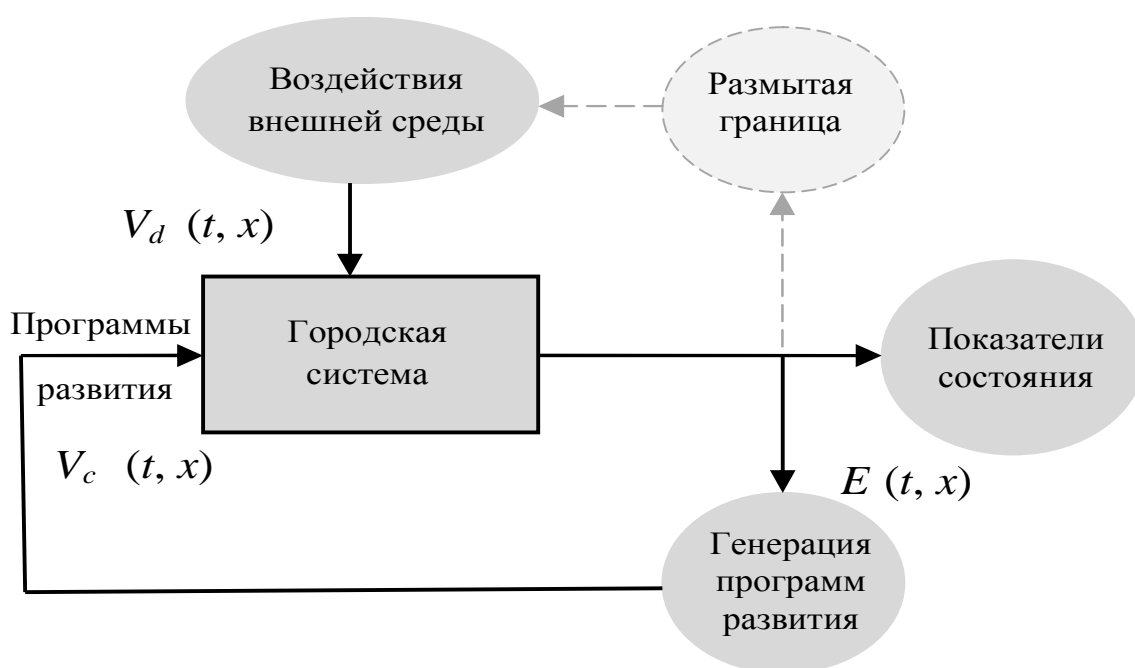


Рис. 2.3 – Структурная схема взаимодействия внешних и внутренних факторов с городской системой

Следует отметить, что между параметрами V_c , V_d и E существуют определенные обратные связи, то есть нельзя считать входные процессы независимыми от выходного процесса.

Необходимо отметить, что эти зависимости имеют различную природу. Входной процесс $V_c(t, x)$ связан с $E(t, x)$ в том смысле, что при разработке планов и программ развития городской системы учитывается выходной процесс, так как цели и критерии развития формулируются обычно относительно выходного процесса. Можно сказать, что связь между $E(t, x)$ и $V_c(t, x)$ вычислительная: она создается исследователем и реализуется городскими властями для достижения определенных целей

развития городской системы. Структура этой связи показана на рис. 2.3 пунктирными линиями.

Другой входной процесс $V_d(t, x)$, имитирующий воздействие внешней среды, связан с $E(t, x)$ через так называемую «размытую границу». Воздействие внешней среды состоит в том, что внешняя среда, воздействуя на городскую систему, сама испытывает на себе влияние градостроительной системы. Пространственная среда этого взаимодействия не имеет четких границ.

Входной и выходной процессы представляют собой совокупность переменных, с помощью которых описывается изменение во времени и пространстве программ развития города, воздействий внешней среды и показателей состояния городской системы. Эти переменные могут относиться к экономическим, градостроительным, экологическим и другим аспектам функционально-пространственной структуры городской системы.

Количество факторов и соответствующих им переменных, которые так или иначе следовало бы учитывать при описании городской системы, огромно. Поэтому для получения конструктивных результатов необходимо попытаться сократить их количество. Но здесь необходимо иметь в виду, что какой бы способ сокращения объема списка переменных не был применен, в результате всегда присутствует неопределенность [10, 13].

Поскольку речь пойдет о моделировании градостроительной системы, то необходимо чтобы в модели отображались особенности города как системы.

2.4 Формальное описание класса городских систем

Городские системы образуют особый класс динамических систем, в которых детерминированный характер наблюдаемых процессов сочетается с их стохастической природой. Для формализованного описания этих качественных особенностей рассмотрим гипотетическую городскую систему, понимая под системой соединение каких-либо блоков с указанием их входов и выходов.

В такой интерпретации понятия системы каждый из выделенных тем или иным способом блоков осуществляет преобразование того, то действует на его входе, в то, что оказывается на выходе. Существенным в этом преобразовании является связь его со временем и пространством.

Пространственно-временные факторы выступают в качестве основных аргументов процессов, возникающих в городской системе, и определяют ее пространственную динамику.

Изучение системы можно производить на различных интервалах времени. Чаще всего этот интервал конечный:

$$T = \{\tau: 0 \leq \tau \leq t\},$$

где t – некоторая константа.

Однако для изучения специальных свойств городской системы могут потребоваться полубесконечные интервалы

$$T = \{\tau: -\infty < \tau \leq t_0\},$$

или

$$T = \{\tau: t_0 \leq \tau < \infty\}.$$

При определении этих интервалов времени τ могут образовывать непрерывное множество или дискретное множество. В первом случае время в модели рассматривается как непрерывная величина, во втором случае время рассматривается дискретно.

Дискретное время часто оказывается более удобным. Это связано с тем, что экспериментальная информация о системе формируется в дискретные моменты времени. Кроме того, городская система достаточно инерционна, в связи с чем меняет свои свойства в дискретные моменты времени.

Обычно шаг дискретизации выбирается постоянным, и тогда

$$T = \{m\Delta: 0 \leq m\Delta \leq n\Delta\},$$

где $m = 1, 2, \dots, \Delta$ – шаг дискретизации, n – фиксированное целое число.

В отличие от временной, пространственная переменная может иметь различный содержательный смысл. Если под городским пространством понимать некоторую плоскость, то пространственной переменной является точка в этой плоскости. Если ввести в ней некоторую систему координат, то каждой точке городской плоскости можно сопоставить совокупность чисел. Так, для Декартовой системы координат каждая точка будет характеризоваться парой вещественных чисел.

Иногда удобно сделать дискретную шкалу для измерения координат точек на городской территории в силу ограниченной точности измерений. Тогда точка трансформируется некоторый участок плоскости (область), размеры которого определяются погрешностью измерений, а координаты задаются парой целых чисел. Поскольку такие пары различные, то их

можно преобразовать в одномерный массив, введя определенное правило нумерации. Городское пространство можно интерпретировать и несколько шире. Наиболее естественным обобщением является трехмерное городское пространство. В этом случае каждый элемент пространства будет характеризоваться тройкой чисел, которые будут определять его геометрические положения в городском объеме.

Однако городское пространство не всегда строится на геометрической аналогии. В частности, для описания городского пространства используются дополнительно экономические, экологические, технические, геологические и другие показатели.

Выводы

Эффективное управление территориями, в том числе и урбанизированными, становится необходимым условием ее развития и требует учета большого количества неопределенностей, обусловленных проведением исследований, экспериментов, разработок, испытаний и т.д., необходимостью неоднократных возвратов к предыдущим этапам и стадиям. Кроме того, принятие решений всегда характеризуется неясностью относительно будущего состояния процесса развития градостроительной системы и неясностью перспектив и возможностей сценариев ее развития.

На современном этапе город является целостным системным образованием, состоящим из сложной совокупности взаимосвязанных элементов, и одновременно неотъемлемым компонентом территориальных систем более высокого ранга. Поэтому при прогнозировании как регионального социально-экономического развития, так и муниципального необходимо учитывать соподчиненность стратегических направлений и ориентиров развития на региональном и муниципальном уровнях. Общая цель прогнозных разработок – формирование целостных вариантов социально-экономического развития территории, обоснование концепции регионального развития, которая является ключевым документом, обеспечивающим проведение активной региональной политики.

Для этого необходимо, чтобы достигалась непрерывность прогнозирования, то есть существовали взаимоувязанные прогнозы всех временных горизонтов, которые периодически пересматриваются и уточняются в связи с возможными изменениями в реальной обстановке под воздействием факторов неопределенности.

3. КЛАССИЧЕСКИЕ ОДНОРОДНЫЕ СТРУКТУРЫ В МОДЕЛИРОВАНИИ ГОРОДСКОЙ ДИНАМИКИ

*Искусственный интеллект – это то,
что еще не создано.*

*(единственное определение ИИ,
которое невозможно оспорить)*

«Нет моделей – нет понимания»

Н. Хейфиц, 1975

*«Человек понимает только то,
что он умеет моделировать»*

И. А. Полетаев, 1958

Теория однородных структур (ТОС), у истоков которой стояли такие современные кибернетики и математики, как Джон фон Нейман, С. Улам и Э. Мур, привлекла к себе внимание целого ряда исследователей еще в середине прошлого столетия. Однородные структуры (ОС) в их первоначальном виде были определены Дж. фон Нейман на базе предложения С. Улама с целью получить более реалистическую и хорошо формализуемую модель для исследования поведения сложных саморазвивающихся систем.

На сегодня ОС-модели имеют ряд синонимов, из которых наиболее распространенным является термин «клеточные автоматы (*Cellular Automata*)». В 1969 году Конрад Цузе выпустил книгу «*Rechnender Raum*» (*Вычислительное пространство*), в которой были изложены мысли о том, что все физические процессы – есть вычисления, в то время как наша Вселенная есть ничто иное, как «*cellular automata*» (CA), то есть «клеточный автомат» [1, 3, 6, 10].

Теоретические работы Э. Кодда, Г. Хедлунда, А. Р. Смита, Х. Ямада, В. Аладьева, Т. Китагава и целого ряда других исследователей положили начало современной математической теории однородных структур,

которая выросла в настоящее время в самостоятельную ветвь абстрактных автоматов, имеющую многочисленные приложения в различных областях науки и техники, особенно параллельной обработке информации, параллельных алгоритмов, вычислительных наук и информатике, связанных с математическим и компьютерным моделированием. Особую роль в качестве концептуальных и прикладных моделей пространственно-распределенных динамических систем играют социально-организационные системы.

Последние исследования [2, 3, 10], проведенные в области изучения нелинейных и открытых систем, привели к пониманию города как сложной и эволюционирующей системы. Город, как самоорганизующаяся система, является идеальным объектом для математического и компьютерного моделирования.

Классические однородные системы характеризуются фазой переходов, что может быть основой для генерирования сложных структур через простые правила переходов. В таком случае такая технология представляется подходящей для моделирования динамики развития градостроительных систем. В разделе обсуждаются основные принципы моделирования на основе использования классических однородных структур и применение этой технологии для моделирования развития и роста градостроительных систем. Определены преимущества и ограничения применения классических однородных структур для моделирования городского развития.

На примере решения транспортных задач показано применение исследуемой технологии для моделирования движения транспортных потоков в городских условиях, а также рассмотрены вопросы моделирования развития агломерации с использованием теории классических однородных структур, что позволяет говорить о новой и весьма перспективной среде моделирования дискретных параллельных процессов и явлений пространственного развития градостроительных систем.

3.1 Базовая концепция моделирования на основе классических однородных структур

Однородные структуры, как было сказано выше, представляют собой высоко формализованные модели абстрактных объектов, которые развиваются по простым всюду одинаковым правилам взаимодействия.

Пространство однородных структур (*ОС*-пространство) представляет собой регулярную решетку, каждая клетка которой представляет некоторый идентифицируемый элемент (элементарную ячейку), которая допускает лишь конечное число состояний. Развитие такого *ОС*-пространства происходит в дискретной временной шкале ($t = 0, 1, 2, \dots$) в соответствии с конечным набором правил изменения состояния элементов пространства в каждый t – момент времени как функция состояний самой ячейки и конечного числа ее ближайших соседей в предыдущий $(t-1)$ – момент времени. Несмотря на такую простую организацию и принцип функционирования, однородные структуры допускают достаточно сложное поведение, что обеспечивает моделирование большого количества объектов, процессов и явлений в различных областях науки и техники [5].

Рассмотрим более предметно концепцию построения и функционирования однородных структур, как перспективной среды моделирования такой сложной организационной системы как город.

Прежде всего, необходимо дать базовое понятие d -мерных однородных структур (d -*ОС*; $d \geq 1$). Формально понятие классической d -*ОС* определяется как упорядоченная четверка компонент

$$d\text{-}ОС = \langle Z^d, A, \tau^{(n)}, X \rangle,$$

где Z^d – компонента, представляющая собой множество всех d -мерных кортежей – целочисленных координат точек в Эвклидовом E^d пространстве, то есть Z^d представляет собой целочисленную решетку в E^d пространстве, чьи элементы служат для пространственной идентификации единичных автоматов. При этом компонента Z^d определяет однородное пространство структуры, в котором она функционирует.

A – конечное непустое множество, называемое алфавитом внутренних состояний единичных автоматов структуры, представляющее собой множество состояний, которые может принимать каждый элементарный автомат структуры. В качестве A -алфавита используется множество $A = \{0, 1, 2, \dots, a - 1\}$, содержащее a элементов – целых чисел от 0 до $a - 1$.

$\tau^{(n)}$ – локальная функция переходов (*ЛФП*), которая задает состояние каждому единичному автомату структуры в момент времени t на основе состояний всех соседних ему автоматов (согласно индекса соседства X) в момент времени $t - 1$. *ЛФП* представляет собою отображение $\tau^{(n)}: A^n \rightarrow A$.

X – индекс соседства структуры, представляет собой упорядоченный кортеж n элементов из Z^d , который служит для определения автоматов-соседей любого единичного автомата структуры, то есть тех автоматов, с которыми данный единичный автомат непосредственно связан информационными каналами, то есть обменивается информацией.

Важным элементом однородных систем является размерность (d) однородного пространства. Размерность ОС-модели играет важную роль для классификации всего множества моделей на два множества: одномерной ($d=1$) и более высших ($d \geq 1$) размерностей.

В качестве простейшего примера структуры 2-ОС пространство Z^2 можно представить в виде ячеек. В каждую ячейку пространства Z^2 помещается копия автомата Мура, чей алфавит внутренних состояний – A . Автомат Мура представляет собой конечный автомат, выход которого в данный момент времени t зависит только от его внутреннего состояния в этот же момент времени t и не зависит от значения его входов. Состоянием S_t клеточного автомата в момент времени $t > 0$ есть некоторая функция $F(Bx_1, \dots, Bx_n, t-1)$ его входов в момент времени $(t-1)$ при этом, выход автомата в момент времени t соответствует его внутреннему S_t -состоянию и при наличии связи между автоматами их взаимодействие показано на рис. 3.1.

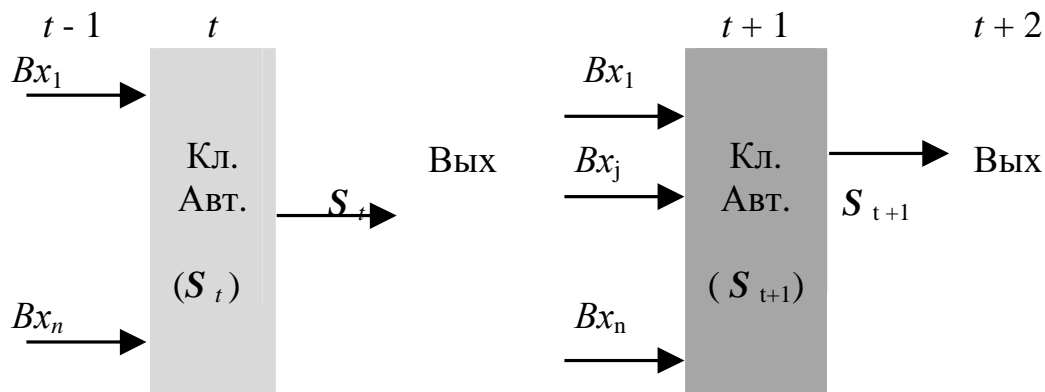


Рис. 3.1– Временная схема взаимодействия двух связанных автоматов Мура

В качестве входов, внутренних состояний и выходов клеточного автомата ОС-модели используются символы из некоторого фиксированного конечного A -алфавита. В этом случае каждая точка Z^2 определяет координату единичного автомата, помещаемого в данную точку, обозначаемый как автомат с координатой $z \in Z^2$. В настоящее время в ОС-моделях широко используются классические индексы

соседства Дж. фон Неймана и Мура, представленные соответствующими множествами пар координат:

$$X_n = \{(0,0), (0,1), (1,0), (0,-1), (-1, 0)\};$$

$$X_m = \{(i, j)\}, (i, j \in \{0, 1, -1\}).$$

Геометрическая интерпретация индексов соседства Дж. фон Неймана и Мура называются шаблонами соседства (*ШС*), которые представлены на рис. 3.2. К наиболее часто используемым индексам соседства и соответствующим им шаблонам соседства (наряду с рассмотренными индексами соседства Джон фон Неймана и Мура) можно отнести следующие:

0	1
---	---

$$X_1 = \{0,1\}$$

0,1		
1,0	0,0	1,0

$$X_2 = \{(0,0), (0,1), (1,0)\}$$

-1	0	1
----	---	---

$$X_3 = \{-1,0,1\}$$

0	1	2	3	k	n-1
---	---	---	---	-------	---	-------	-----

$$X_4 = \{0, 1, 2, 3, \dots, n-1\}$$

При этом, индексы соседства X_1 и X_2 являются простейшими соответственно для *1-ОС* и *2-ОС*. В общем случае для d -мерной классической *ОС*-модели простейший индекс соседства X принимает следующий вид, а именно:

$$X = \{(\underbrace{0,0, \dots, 0}_d), (\underbrace{1,0,0, \dots, 0}_d), (\underbrace{0,1,0, \dots, 0}_d), \dots, (\underbrace{0,0, \dots, 0,1}_d)\}$$

$$\underbrace{\hspace{15em}}_{d+1}$$

то есть один автомат простейшего *ШС* является центральным и от него по каждой оси координат расходится строго по одному единичному z -автомату структуры. Каждый единичный автомат структуры в любой дискретный t момент времени может получать информацию только от своих непосредственных соседей, определяемых индексом соседства X , и передавать информацию о своем текущем состоянии только этим автоматам.



Рис. 3.2 – Шаблоны соседства Джон фон Неймана (а) и Э.Ф. Мура (б)

Таким образом, непосредственными соседями единичного автомата $z \in Z^2$ являются автоматы $z + x_1, z + x_2, \dots, z + x_n$, где $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}; x_j \in Z^2 (j = 1 \dots n)$. Индекс соседства X описывает единый шаблон соседства (*ШС* – единый геометрический образ соседей-автоматов) для каждого единичного z -автомата структуры. *ШС* так же определяет позиции автоматов-соседей относительно каждого конкретного единичного автомата, который имеет с ними непосредственный информационный интерфейс. Если индекс соседства X содержит элемент $0^d = \{0, 0, 0, \dots, 0\}$, то каждый единичный автомат структуры принадлежит собственному *ШС*. Не нарушая общности, можно предположить, что X -индекс соседства содержит 0^d – элемент, определяющий центральный автомат *ШС*.

В литературе доказано [1,2], что динамика d -ОС ($d \geq 1$) не зависит от выбора в качестве центрального любого автомата *ШС* структуры. Таким образом, деление d -ОС на структуры с ярко выраженным градиентом передачи информации, обусловленным выбором центрального автомата шаблона соседства, не изменяет динамических и вычислительных возможностей ОС-моделей во временном отношении, хотя и влияет на их конструктивные характеристики, то есть на характеристики, зависящие от геометрии пространства структуры.

Например, 1 -ОС с индексами соседства $X = \{-k, \dots, -1, 0, 1, \dots, p\}$ при $k, p \in \{0, 1, \dots, n-1\}$ и определяющем соотношении $p + k + 1 = n$ в динамическом отношении строго эквивалентны друг другу, то есть на каждый шаг моделируемой 1 -ОС с индексом X из указанного класса требуется только один шаг моделирующей ее 1 -ОС с индексом соседства из того же класса X .

Среди шаблонов соседства (*ШС*) различают связные и несвязные, этот показатель в общем случае существенно влияет на динамику ОС-моделей.

ШС называется связным, если занимаемая им область связана в топологическом смысле, иначе шаблон соседства называется несвязным.

Так, например, две 1-ОС с индексами соседства $X_1 = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$ и $X_2 = \{0, 1, 2, 4, 5, 7, 8, 10\}$ имеют связный и несвязный ШС соответственно (рис. 3.3), что даже для случая идентичных локальных функций перехода может приводить к различиям в их динамике.

Первые три рассмотренные компоненты d -ОС, а именно: A -алфавит состояний единичных автоматов, однородное пространство Z^d структуры и X -индекс соседства образуют однородную среду, которая является статической составляющей ОС-модели. Статическая часть описывает лишь физическую организацию структуры и ее геометрию, но не описывает взаимодействие (динамику) между единичными автоматами. Для задания функционирования d -ОС необходима возможность описывать текущие состояния всех единичных автоматов в любой дискретный момент времени $t \geq 0$.

Набор текущих состояний всех единичных автоматов называется конфигурацией d -ОС ($K\Phi$). А именно, конфигурация d -ОС есть произвольное отображение $K\Phi : Z^d \rightarrow A$. Множество всевозможных конфигураций относительно Z^d и A обозначим как $C(A, d)$, то есть можно записать тождество:

$$C(A, d) = \{ K\Phi / K\Phi : Z^d \rightarrow A \}$$

Функционирование d -ОС осуществляется в дискретной шкале времени $t = 0, 1, \dots$ и определяется локальной функцией перехода (ЛФП) $\tau^{(n)}$, которая задает состояние каждому единичному автомату структуры в момент времени t на основе состояний всех соседних ему автоматов в момент времени $(t-1)$. Для классических ОС-моделей ЛФП представляются в виде:

$$\tau^{(n)}(a_1, a_2, \dots, a_n); \quad a_j, a_1^* \in A \quad (j = 1 \dots n) \quad (3.1)$$

$$a_1, a_2, \dots, a_n \rightarrow a_1^* - \text{множество параллельных подстановок}, \quad (3.2)$$

где a_j – состояние любого z -автомата d -ОС и его соседей (согласно индекса соседства $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$) в момент времени $(t-1)$, а a_1^* – состояние этого же автомата в следующий момент времени $t > 0$. При этом z -автомат ОС-структуры предполагается центральным относительно приписываемого ему шаблона соседства (ШС).

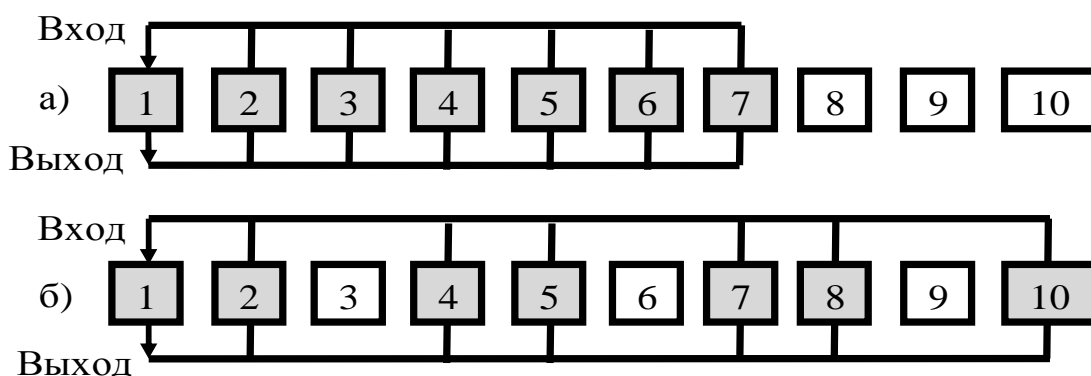


Рис. 3.3 – Схема непосредственного информационного обмена в связном (а) и несвязном (б) шаблонах соседства (ШС) одномерной структуры

Наиболее удобным является формальное представление *ЛФП* когда вычисление последующего состояния текущего *z*-автомата структуры выполняется по формуле (3.1). В целом ряде случаев обязательно требуется использование *ЛФП* в виде множества параллельных подстановок (3.2).



Множество параллельных подстановок определяют программу (параллельный алгоритм) функционирования классической *ОС*-модели. Параллельные подстановки представляют собой низкоуровневый параллельный язык программирования в среде *ОС*-моделей.

Формульное представление *ЛФП* особенно предпочтительно при компьютерной реализации *ОС*-моделей. Вопросы формального представления *ЛФП* достаточно подробно изложены в монографиях [3, 4].

Вышеперечисленные три черты (однородность, параллелизм, локальность взаимодействия) обеспечиваются уже самой *ОС*-аксиоматикой. В свете перечисленных свойств, классические *ОС* являются высоко абстрагированными моделями реального физического мира, функционирующими во времени и пространстве. Поэтому классические *ОС* лучше (чем другие формальные архитектуры) приспособлены для решения задач моделирования сложных динамических систем. Все вышесказанное, а также имеющиеся на сегодня многочисленные примеры позволяют сделать вывод, что *ОС* могут

представлять довольно существенный интерес как в качестве новой перспективной среды моделирования так и исследования многих дискретных процессов, явлений и феноменов.

Завершая изложение базовых элементов *ОС*, необходимо отметить, что в настоящее время теория *ОС* находится в стадии довольно интенсивного развития и дальнейшая работа в данном направлении чрезвычайно важна с различных точек зрения, учитывая междисциплинарный характер общей *ОС*-концепции [4].

3.2 Типы классических однородных структур и отношения между типами. Понятие мелкозернистого параллелизма

Большое разнообразие модификаций однородных структур, предназначенных для моделирования пространственной динамики, привело к появлению понятия *мелкозернистого параллелизма*, который объединил в себе все модели клеточных автоматов на основе двух свойств:

- итерационный процесс вычисления новых состояний клеток;
- локальность межклеточных взаимодействий, когда каждая клетка вычисляет функцию перехода, используя в качестве переменных состояний ограниченное число близлежащих клеток.

Все однородные структуры подразделяются на бесконечные и конечные. При этом, конечные *ОС*-модели представляют собой обычные конечные автоматы, которые имеют специфическую клеточную организацию, характеризующуюся набором конечного количества взаимосвязанных идентичных единичных автоматов, которые функционируют синхронно или асинхронно согласно заданным локальным функциям переходов и индексом состояния, а также граничным условиям.

Однако, клеточная организация таких клеточных автоматов и принцип их функционирования способствуют появлению у них качественно новых свойств, недоступных конечным автоматам традиционной организации. Прежде всего это относится к их возможности выполнять параллельную обработку информации и вычисления, а также более адекватно моделировать множество естественных и искусственных процессов, объектов, явлений и феноменов, характеризующихся ярко выраженным коллективным поведением.

Бесконечные *ОС* представляют собой бесконечные клеточные автоматы, состоящие из бесконечного числа локально взаимосвязанных между собой единичных идентичных автоматов, чья глобальная динамика

определяется локальными взаимодействиями всех соседних (согласно индексу соседства) автоматов. При определенной степени абстрагирования бесконечные ОС можно ассоциировать с некоторыми моделями абстрактных вселенных, динамика которых определяется их внутренними законами развития. Такого типа ОС-модели оказываются удобными в случаях, когда требуется исследовать динамику поведения процессов и феноменов в основе которых лежат принципы дискретности, локальности взаимодействий, обратимости. Подобные модели могут с успехом применяться в таких областях, как теория эволюции и развития, информатика, кибернетика, синергетика, искусственный интеллект и др.

Таким образом, конечные ОС используются в качестве моделей некоторого объекта, бесконечные структуры представляют собой саму среду моделирования, в которую погружается та или иная исследуемая модель.

На множество состояний каждой клетки не накладывается никаких ограничений. Состояние может описываться булевыми значениями, целочисленными, вещественными и символьными. Более того, модели, основанные на клеточных автоматах, могут иметь не только синхронный режим смены состояний клеточных автоматов, но и асинхронный. Асинхронный режим предполагает, что смена состояний клеточных автоматов происходит не одновременно в момент времени $(t+1)$, а в любом порядке. Этот порядок может быть случайным или заранее заданным. Для моделирования пространственной динамики во многих случаях используются вероятностные ОС, а также ОС с самыми разными локальными функциями переходов.

Отношения между типами КОС, которые различаются алфавитами, типами локальных функций переходов показано на рис. 3.4.

Что наша жизнь игра.

3.3 Моделирование на основе однородных структур: игра Дж. Конвея «Life»

В качестве примера рассмотрим известную игру «Life», впервые опубликованную в американском журнале «Scientific American» за февраль 1971 г. Игра Дж. Конвея «Life» вызвала большой интерес целого ряда исследователей. Однако изучение однородных структур не получило своего развития до 90-х годов прошлого века до тех пор пока

компьютерные средства не получили мощные средства отображения графической информации, с одной стороны, и не были получены результаты в области теории сложности, синергетики, теории хаоса, с другой. С точки зрения теории сложности всякая сложная структура может быть получена в результате взаимодействия достаточно простых правил, что позволяет исследовать процессы и явления в их динамике и в эволюционном развитии [7].



Рис. 3.4 – Типы КОС и отношения между ними

Действие игры происходит на некоторой плоскости, которая разделена на клетки. Каждая клетка окружена 8 такими же клетками. Эта игра представляет собой типичную классическую двумерную ОС-модель с алфавитом $A = \{0,1\}$ или, другими словами клетка может быть в состоянии «гибели» или «рождения». В игре «Life» используется индекс соседства Мура. Локальная функция переходов $(\tau^{(9)})$ такой модели

описывается следующей простой формулой, а именно:

$$\tau^{(9)}(x_0, x_1, x_2, \dots, x_8) = 1/0, \quad (3.3)$$

где в качестве текущего клеточного автомата рассматривается x_0 – автомат, а x_j , где $(j=1, \dots, 8)$ представляет 8 непосредственных соседей клеточного автомата x_0 .

Иными словами, любой x_0 – автомат 2-ОС переходит в состояние «1» только тогда, если:

- текущий z -клеточный автомат x_0 находится в состоянии «0» и три его любых соседа находятся в состоянии «1»;
- z -клеточный автомат x_0 может находиться в состоянии «1» и два либо три его соседа находятся в состоянии «1»;
- во всех иных случаях z -клеточный автомат x_0 переводится в состояние «0».

При большем числе состояний A -алфавита 2-ОС-модели, сложной геометрии ИС, более усложненной ЛФП резко возрастает вероятность появления ошибок, что может свести на нет большой объем работы по моделированию. Поэтому, как правило, имитация ОС-моделей производится посредством компьютерного моделирования, чему во многом способствует широкое распространение компьютеров с хорошими средствами отображения информации.

Используя такие простые локальные функции переходов, ОС-модель позволяет генерировать очень сложные структуры через процессы рождения и гибели элементарных клеточных автоматов.

На рис. 3.5 представлены примеры результатов, полученные в результате моделирования игры «Life».

3.4 Классические однородные структуры в моделировании пространственного развития градостроительной системы

Необходимо отметить, что пространственное развитие градостроительных систем по своей природе по многим аспектам подобно поведению клеточных автоматов [8]. Городское пространство можно представить как совокупность ряда ячеек, где каждая из ячеек имеет конечное множество возможных состояний, определяющих степень городского развития. Состояние каждой ячейки меняется в дискретные моменты времени согласно определенным и установленным локальным функциям перехода.

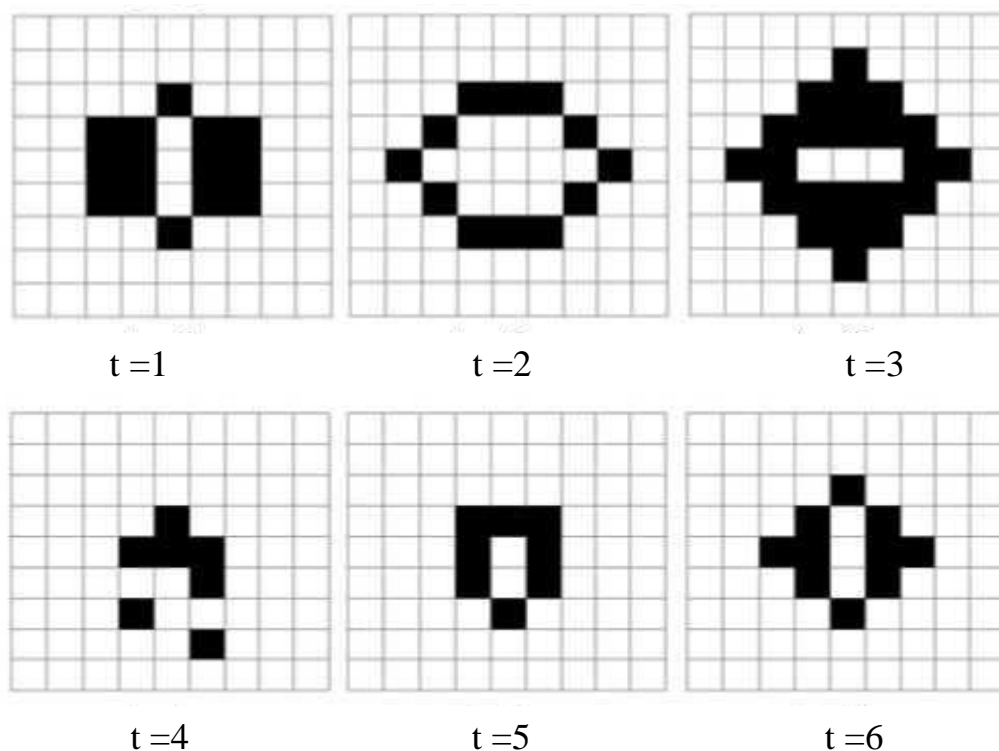


Рис. 3.5 – Примеры периодических структур, реализующихся в игре «Life» (черные клетки означают рождение, белые – гибель, t – шаг моделирования)

Необходимо отметить, что пространственное развитие градостроительных систем по своей природе по многим аспектам подобно поведению клеточных автоматов [8]. Городское пространство можно представить как совокупность ряда ячеек, где каждая из ячеек имеет конечное множество возможных состояний, определяющих степень городского развития. Состояние каждой ячейки меняется в дискретные моменты времени согласно определенным и установленным локальным функциям перехода.

3.4.1 Городское пространство как совокупность однородных структур

Представим гипотетическую городскую систему в виртуальном клеточном пространстве. Пространство такой городской системы представляет собой двумерную регулярную сетку размерностью $n \times n$ ячеек, или, другими словами, условных земельных участков. Каждый из

земельных участков может иметь два возможных состояния: принадлежит городу или не принадлежит городу. Окрестность вокруг каждого земельного участка представляет собой область приложения сил и средств относительно рассматриваемого земельного участка (ячейки). Локальные функции переходов определяют, по какому правилу земельный участок изменяет свое состояние, следовательно правила определяют характер процесса развития в данном локальном пространстве. Такие правила обычно представлены в виде набора продукций «ЕСЛИ-ТО», которые по своей сути достаточно просты. Однако совокупность таких простых конструкций позволяет моделировать сложные процессы пространственного развития городской системы.

В условиях гипотетической городской системы предполагаем равную социально-экономическую и экологическую обстановку на всей территории региона. Таким образом, земельные участки, которые изображены черным цветом на рис.3.6, их состояние представляется как городское; все остальные земельные участки рассматриваются как пригородная территория с одинаковыми социально-экономическими и экологическими условиями.

Поэтому, единственным фактором, который может быть причиной развития гипотетической городской системы может быть количество благоустроенных либо освоенных участков земли в окрестностях рассматриваемого земельного участка, тем самым подразумевается возникновение новых городских участков земли, которые находятся под мощным влиянием участков уже включенных в городскую зону.

Используя шаблон соседства Мура, изменение состояния земельных участков будет происходить в соответствии с правилами:

Правило 1

ЕСЛИ	<i>в шаблоне соседства Мура существует три или более разработанных земельных участка среди земельных участков, принадлежащих пригородной зоне,</i>
ТО	<i>земельные участки, принадлежащие пригородной зоне, будут переведены в состояние, соответствующее состоянию участков городской зоны.</i>

В соответствии с рассмотренным локальным правилом, в модели генерируется развитие городской системы в различные моменты времени, как это показано на рис. 3.6.

Однако в реальных условиях природно-географические условия городской среды не всегда равномерны и идеальны. Например, значительные отличия могут быть в особенностях рельефа местности, что влияет на пространственную организацию жизненной среды населения и различных видов деятельности людей (труда, быта, отдыха и т. д.). С целью сокращения затрат на строительство и эксплуатацию объектов городского хозяйства, например, системы водоотведения и водоснабжения, городское строительство может быть ограничено территориальными зонами, которые имеют рельеф меньше чем 300 метров. В соответствии с этим ограничением, территория с рельефом более чем 300 метров не будет рассматриваться как территория, обеспечивающая пространственное и социально-экономическое развитие города. Учитывая это обстоятельство, необходимо дополнить условие развития гипотетической городской среды дополнительным правилом, отражающим особенности пространственной организации рельефа местности. Такое правило может быть представлено еще одним выражением ЕСЛИ-ТО.

Правило 2

ЕСЛИ	<i>перепад высот рельефа местности более чем 300 метров</i>
ТО	<i>земельные участки, принадлежащие пригородной зоне, не будут рассматриваться как развивающиеся (то есть их состояние не будет изменяться)</i>

С учетом локальных правил 1 и 2 сценарий развития городского пространства на рассматриваемой территории показан на рис.3.6. Дополнительно на процесс городского развития оказывает влияние состояние улично-дорожной сети. Например, если через город проходит транспортная магистраль, то в этих условиях наиболее перспективным направлением развития городского пространства будет направление вдоль этой транспортной магистрали. Чтобы учесть влияние состояния улично-дорожной сети в модели развития городской системы, необходимо дополнительно сформулировать условие, отражающее особенности транспортной системы.

Такое правило может быть представлено дополнительным выражением ЕСЛИ-ТО:

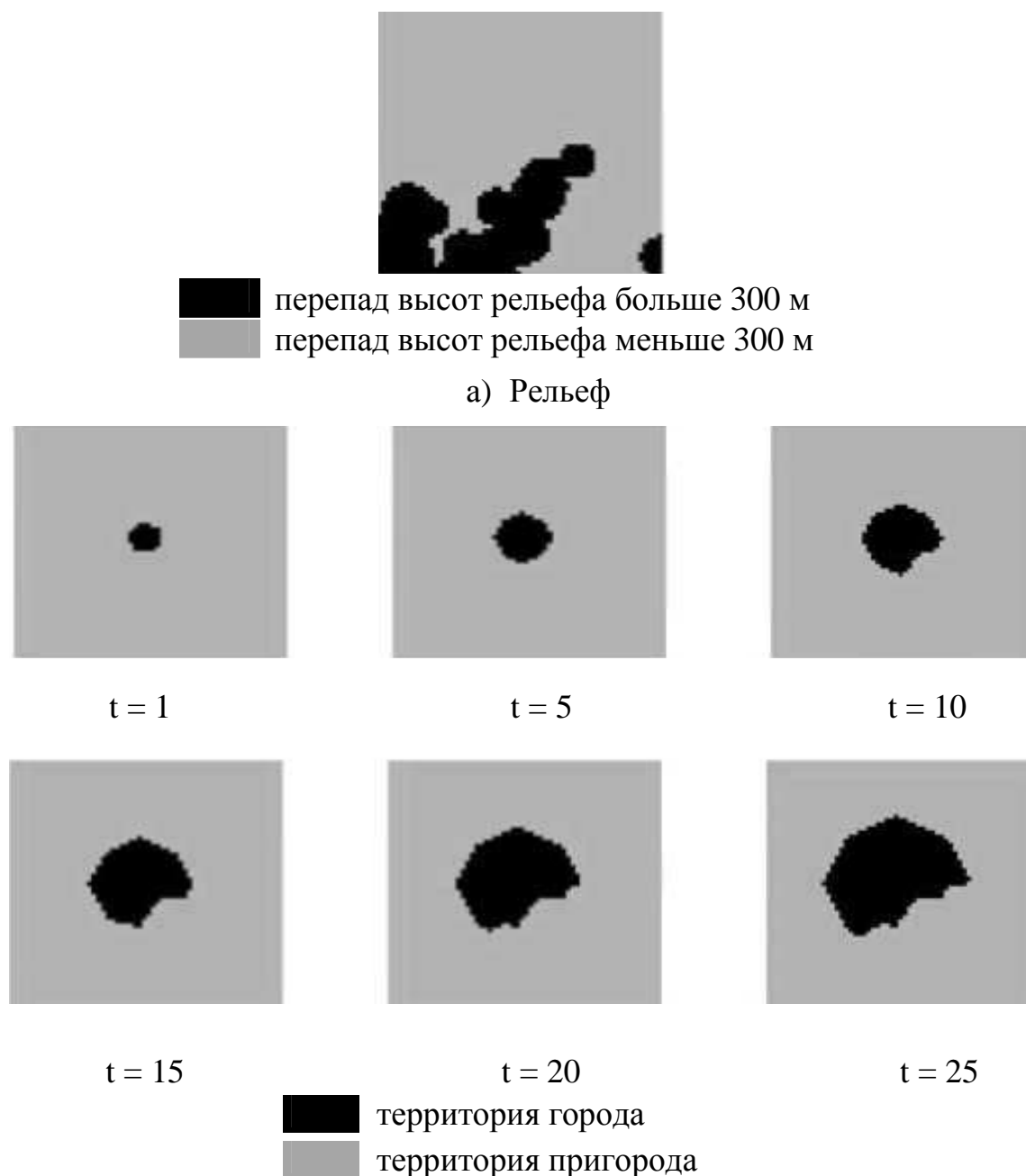
ЕСЛИ	<i>в шаблоне соседства Мура существует один или два разработанных земельных участка среди земельных участков, принадлежащих пригородной зоне и через них проходит транспортная магистраль,</i>
ТО	<i>земельные участки, принадлежащие пригородной зоне, будут переведены в состояние, соответствующее состоянию участков городской зоны.</i>

С учетом локальных правил 1, 2 и нового правила 3, сценарий развития городского пространства на рассматриваемой территории показан на рис. 3.7. Применяя подобный подход, можно формировать в модели неограниченное количество локальных правил для отображения особенностей социальных, экономических или экологических факторов, влияющих на процесс развития современных городов.

Рассмотрен упрощенный подход к формированию модели динамично развивающейся городской системы, тем не менее этот подход отражает обобщенную идею применения локальных правил перехода, которые задают состояние каждому единичному автомату структуры 2-ОС, и как элементарные локальные правила переходов могут быть применены для моделирования сложного поведения городской системы в рассматриваемом пространстве Z^2 .

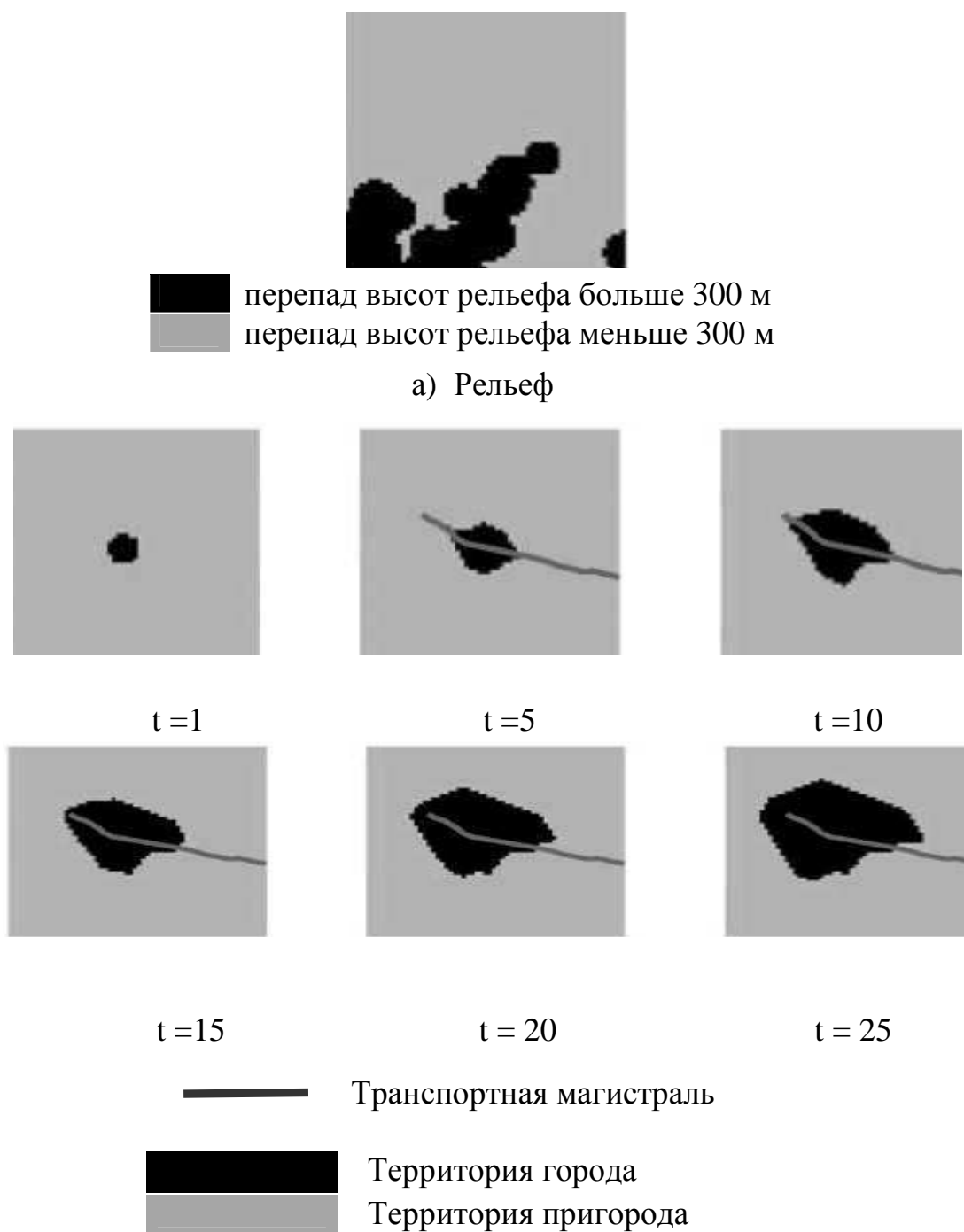
3.4.2 Преимущество однородных структур для моделирования пространственной организации градостроительной системы

Стремительное развитие технологий компьютерной графики, появление географических информационных систем, развитие теории самоподобных структур (фракталов), возникновение новой научной парадигмы – теории сложности и хаоса привело к увеличению количества исследований в направлении применения однородных структур для моделирования динамики развития градостроительных систем. Более того, применение однородных структур становится в настоящее время основным среди исследований, проводимых в области градостроительства.



б) Развивающаяся городская система

Рис. 3.6 – Моделирование динамики градостроительной системы с учетом особенностей рельефа. (а) Рельеф (черный цвет: больше чем 300 м; меньше чем 300 м); (б) Развивающаяся градостроительная система: (ячейки черного цвета соответствуют городской территории, ячейки серого цвета – территория пригорода, t – шаг моделирования)



б) Развивающаяся городская система

Рис. 3.7 – Моделирование динамики градостроительной системы с учетом проходящей транспортной магистрали. (а) Рельеф (черный цвет: больше чем 300 м; меньше чем 300 м); (б) Транспортная магистраль (линия серого цвета); Развитие градостроительного пространства: ячейки черного цвета соответствуют городской территории, ячейки серого цвета – территория пригорода, t – шаг моделирования

Однородные структуры по своей сути являются пространственными, в связи с чем в настоящее время они нашли широкое применение для моделирования и решения различных пространственных проблем. Клеточные автоматы «особенно подходят для городского моделирования, где все процессы и явления имеют пространственное распределение и сами процессы являются интеграцией других, более сложных процессов и явлений» [13, 16].

Такое понимание клеточных автоматов позволяет рассматривать их как мощный инструмент в моделировании пространственно-распределенных систем, особенно в исследовании и прогнозировании перспектив развития города [23, 25].

Кроме пространственного характера классических однородных систем, существует еще ряд особенностей, которые позволяют с успехом использовать ОС-пространство для моделирования развития крупных городов и процессов урбанизации.

3.4.3 Представление знаний о пространственной динамике градостроительной системы с использованием продукций

Модель динамично развивающейся городской системы может быть представлена в виде двумерной регулярной решетки, или сетки, где каждый элемент решетки может принимать только два возможных значения: селитебные земли и земли сельскохозяйственного назначения.

Переход каждой ячейки регулярной решетки из одного состояния (земли сельскохозяйственного назначения) в другое состояние (селитебные земли) основывается на использовании простых правил, которые могут быть реализованы в модели как множество простых утверждений «ЕСЛИ-ТО».

Тем не менее, элементарные объекты, которыми являются ячейки регулярной решетки, взаимодействуя по простым и понятным правилам в виде утверждений «ЕСЛИ-ТО», могут внезапно образовывать странные, часто в том или ином смысле регулярные микро-структуры, «схема» которых не заложена ни в этих объектах, ни в этих правилах. Это свойство называется способностью к самоорганизации.

Простота и интуитивный характер однородных структур не только упрощает процесс построения моделей сложных динамических систем, но это также делает процесс создания таких моделей более легким для разработчиков моделей, чтобы понять развитие динамической системы и

интерпретировать результаты моделирования. Происходит это потому, что модель, основанная на теории однородных структур имитирует то, каким образом «мы изучаем, понимаем и описываем систему и явления реального мира» [34,37].

Пространство однородных структур (ОС-пространство) подобно растровым моделям пространственных данных (РМПД), которые применяются в геоинформационных системах. Растровые модели пространственных данных основаны на способах квантования пространства с помощью регулярных сеток, каждый элемент которых содержит идентификатор, с которым можно связать неограниченный по длине набор атрибутов. При этом важным свойством раstra является неразрывная связь между пространственной и атрибутивной информацией в единой прямоугольной матрице, положение элементов которой определяется номерами строки и столбца. Такая структура представления позволяет в любой момент развернуть любой из привязанных к идентификатору атрибутов слой с размерностью исходной сетки. С помощью такого способа представления данных возможна формализация пространственно-непрерывной информации, которая свойственна большинству пространственно-временных процессов и явлений.

Растровый способ представления пространственных данных служит более точным аналогом реального мира, поскольку представляет собой меньшую абстракцию, с точки зрения содержательных свойств, воспринимаемых непосредственно наблюдателем. Например, даже неподготовленный пользователь легче отличит лес от поля или луга на растровом аэрофотоснимке, чем на тематической карте в векторном формате (без пояснительных подписей).

Кроме того, существуют определенные виды пространственных данных, которые невозможно или чрезвычайно сложно отразить с необходимой степенью детальности в векторном формате. В частности, информация об атмосферном давлении, облачности, высотах над уровнем моря, расстояниях от выбранной точки до всех остальных точек поверхности (поле расстояний) трудно представима явно в векторном виде.

Интеграция свойств однородных структур и возможностей геоинформационных технологий позволяет обеспечить решение таких задач, как обмен данными, хранение данных и их дальнейшую визуализацию. Подобие, то есть похожесть структур между клеточными

автоматами и растровыми данными, используемыми в ГИС, дает возможность интеграции геоинформационных технологий и технологий моделирования на основе однородных структур. В литературе [23, 34,45,47] подробно изложены преимущества интеграции таких технологий. Рассматривается возможность использования моделей конечных клеточных автоматов в программной среде ГИС или внедрение аналитических возможностей ГИС в систему моделирования, основанную на клеточных автоматах.

Например, в литературе [3, 13, 16, 23] разработано направление интеграции клеточных автоматов и ГИС на основании применения операций картографической алгебры, которая позволяет усилить динамику пространственных моделей и возможность обработки пространственных данных внутри единой среды моделирования. В таких источниках как [34, 35, 45, 46] также разработали инструментальные средства на основе интеграции геоинформационных технологий и перспективной среды моделирования – клеточных автоматов для моделирования пространственно-временного развития градостроительных систем. Указанная литература определяет основные направления интеграции двух технологий, которые будут предметом более детального исследования в настоящей монографии.

Применение однородных структур для моделирования развития крупных городов и процессов урбанизации в целом начато с появлением школы теоретической и количественной географии.

Известный Американско-шведский географ и картограф Валдо Тоблер впервые предложил применить *ОС*-пространство для моделирования динамики развития крупных городов [34, 35, 36, 47]. Используя свое первое правило географии «все связано со всем, но вблизи объекты более связаны друг с другом», Тоблер попытался связать значение плотности населения ячейки (площадью территории ограниченной одним географическим градусом широты и долготы) с значениями плотности населения соседних ячеек в предшествующий период времени. В своей статье «Клеточная география» Валдо Тоблер определил пять типов моделей изменения состояний земельных участков (рис. 3.8) [33].

Пусть g_{ij}^t – категория целевого использования земли (земли сельскохозяйственного назначения, земли поселений, земли промышленности, земли лесного фонда и т.д.) с координатами i, j в момент времени t . Предположим, что $z_{ij}^{t+\Delta t}$ – категория целевого

использования земельного участка на момент времени $(t + \Delta t)$. На основании рассмотренных предположений, возможны следующие модели изменения состояний земельных участков:

(1) независимая модель: $z_{ij}^{t+\Delta t}$ – случайная переменная, не связанная с переменной z_{ij}^t .

(2) функционально зависимая модель. Целевое использование земельного участка (i, j) на момент времени $(t + \Delta t)$ зависит от категории использования земельного участка (i, j) в предыдущий момент времени t :

$$z_{ij}^{t+\Delta t} = F(z_{ij}^t).$$

(3) эволюционная модель. Целевое использование земельного участка (i, j) на момент времени $(t + \Delta t)$ зависит от эволюции использования земельного участка (i, j) в предыдущие моменты времени $(t, t - \Delta t, t - 2\Delta t, \dots, (t - k \Delta t))$:

$$z_{ij}^{t+\Delta t} = F(z_{ij}^t, z_{ij}^{t-\Delta t}, z_{ij}^{t-2\Delta t}, \dots, z_{ij}^{t-k\Delta t}).$$

(4) мультивариативная модель. Целевое использование земельного участка (i, j) на момент времени $(t + \Delta t)$ зависит от нескольких характеристик использования земельного участка (i, j) в предыдущие моменты времени

$$t: z_{ij}^{t+\Delta t} = F(u_{ij}^t, v_{ij}^t, w_{ij}^t, \dots, z_{ij}^t).$$

(5) географическая модель. Целевое использование земельного участка (i, j) на момент времени $(t + \Delta t)$ зависит от использования земельных участков совокупности характеристик целевого использования смежных земельных участков на момент времени t :

$$z_{ij}^{t+\Delta t} = F(z_{i+p, j+q}^t).$$

Из всех рассмотренных выше моделей изменения состояний земельных участков наибольший интерес представляет географическая модель. Географическая модель Валдо Тоблера показывает, что состояние земельного участка, имеющего координаты (i, j) зависит от своего собственного состояния и от состояния смежных земельных участков, находящихся вблизи координат (i, j) :

$$z_{ij}^{t+\Delta t} = F(z_{i+p, j+q}^t),$$

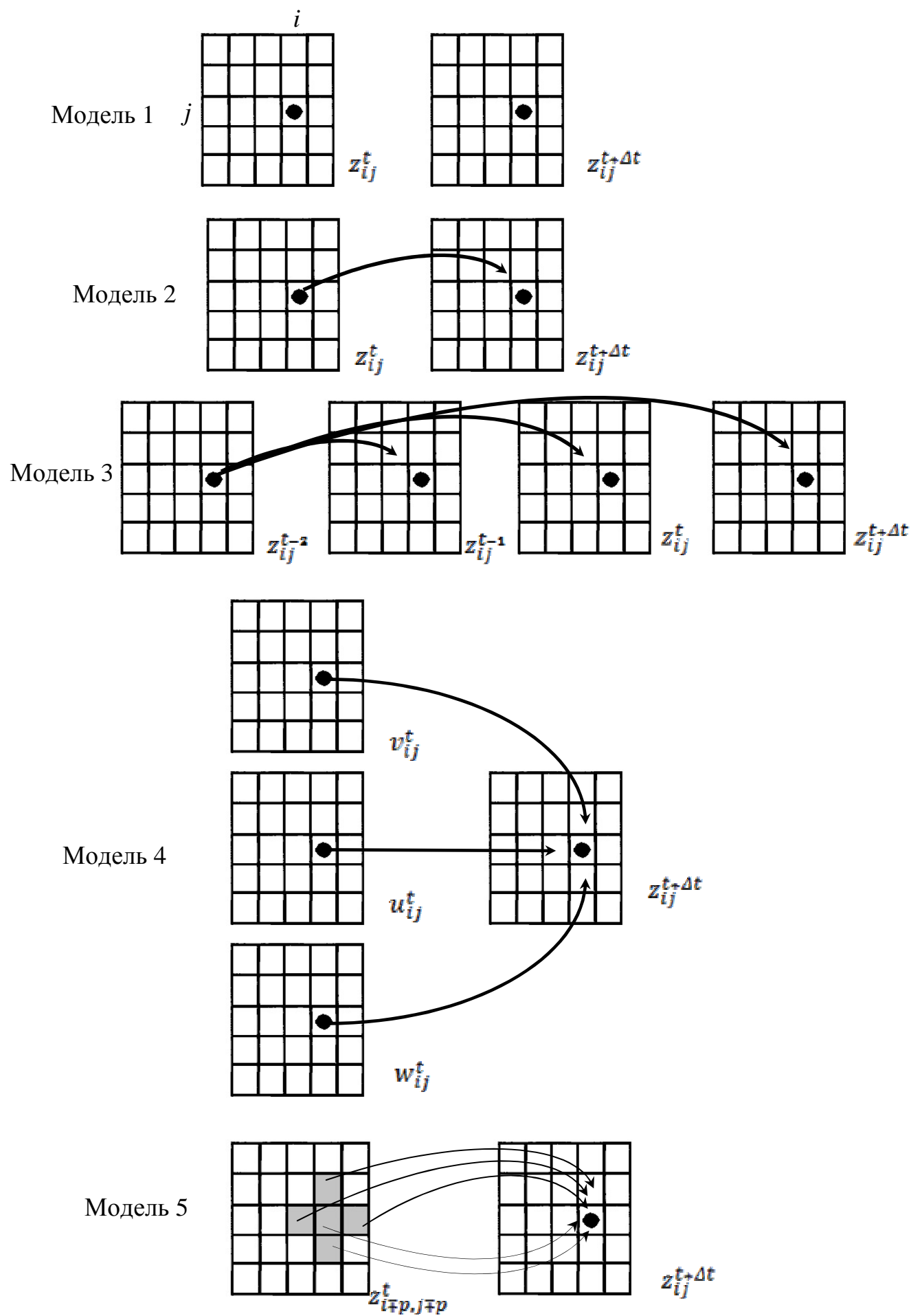


Рис. 3.8 – Графическая иллюстрация моделей пяти типов

где $z_{i,j}^t$ представляет собой категорию землепользования, который имеет земельный участок (земли сельскохозяйственного назначения, земли населенных пунктов, земли промышленности, энергетики, транспорта, связи, радиовещания, телевидения, земли для обеспечения космической деятельности, земли обороны, безопасности и земли иного специального назначения, земли особо охраняемых территорий и объектов, земли лесного фонда, земли водного фонда, земли запаса) с координатами i, j в момент времени t ;

$z_{i,j}^{t+\Delta t}$ категория землепользования того же земельного участка с координатами i, j в момент времени Δt ;

$z_{i+p,j+p}^t$ представляет собой все категории землепользования, находящиеся в заданном шаблоне соседства относительно земельного участка с координатами i, j .

Такой подход устанавливает теоретическую основу для применения однородных структур в моделировании развития и прогнозирования городских процессов.

Под влиянием работ Тоблера пространственная модель 5 (рис. 3.8) была применена к эволюционной игре «Жизнь» Дж. Конвея [3, 5, 7]. В этой модели клетки в состоянии «жизнь» соответствуют городским зонам с установленным порогом плотности населения, которое достаточно для наличия школы. Городская зона может сохранить свою школу, если две или три соседние городские зоны превышают допустимый порог плотности населения. Городская зона может потерять свою школу, если наблюдается снижение плотности населения ниже порогового значения в четырех или более смежных городских зонах. Снижение плотности населения ниже порогового во всех смежных городских зонах приводит к отказу от площади как городской зоны, что эквивалентно состоянию «гибели» клетки в эволюционной игре «Жизнь».

Таким образом, необходимо отметить, что применение классических однородных структур для моделирования городского и регионального развития может рассматриваться как основа для разработки потенциально полезных инструментов количественного и качественного прогнозирования путем интеграции ОС-пространства и возможностей картографической алгебры [45, 46].

Классические однородные структуры продемонстрировали свою способность в создании разнообразных пространственных моделей,

разнообразие которых определяется локальными функциями переходов, и привлекают все большее внимание среди исследователей городских систем и процессов урбанизации в целом.

3.4.4 Определение понятия индекса соседства однородных структур

Вопрос выбора размерности X -индекса соседства, то есть определение количества автоматов-соседей любого единичного автомата структуры с которыми данный единичный автомат непосредственно связан информационными каналами, то есть обменивается информацией в значительной степени прагматический. Согласно теории однородных структур, глобальное поведение самоорганизующейся системы определяется на основании $\{\tau^{(n)}\}$ - локальных функций переходов. Для любой городской системы, принципиальным является вопрос, в какой степени локальные функции переходов оказывают влияние на процесс урбанизации, рост значения города, уровень его пространственной организации [45, 47, 48]. Некоторые факторы, такие как: перепад высот рельефа местности, направления крутизны скатов и уклонов линий оказывают значительное влияние на рост территории при рассмотрении крупномасштабных городских ландшафтов. В то время как другие внешние факторы городского развития, такие как: процесс городского планирования, развитие улично-дорожной сети влияет на развитие всей городской системы, ее агломерации, региона.

Более того, значительное развитие информационных технологий и средств телекоммуникаций привели к изменению пространственной организации городской системы на межрегиональном и глобальном уровнях, то есть носят стратегический характер и могут рассматриваться при изучении, исследовании динамики развития территорий с использованием мелкомасштабных карт.

Таким образом, развитие пространственной организации города связано непосредственно с региональным управлением и является составной частью общегосударственного регулирования развития государства в целом.

3.4.5 Многообразие подходов к определению локальных функций переходов для моделирования пространственной динамики градостроительной системы

Основным компонентом модели основанной на клеточных автоматах, является локальные функции переходов $\{\tau^{(n)}: A^n \rightarrow A\}$, которые задают логику процесса моделирования, следовательно функции $\{\tau^{(n)}\}$ определяют пространственную динамику городской системы. Основная роль локальных функций заключается в математическом описании алгоритмов поведения каждого единичного автомата *ОС*- структуры в момент времени t на основе состояний всех соседних автоматов (согласно индексу соседства X) в момент времени $(t - 1)$.

Существуют разнообразные подходы к определению вида локальных функций перехода для моделей, основанных на клеточных автоматах. Например, локальные функции переходов могут быть заданы в виде взвешенных матриц, в виде метода многокритериальных экспертных оценок, в виде логистической регрессии, а также нейронных сетей и нечетких множеств [1,2, 4,5].

Подход к выбору вида локальных функций переходов может изменяться от очень простых до очень сложных.

3.5 Современная концепция однородных структур как основа для практического моделирования градостроительной динамики

3.5.1 Моделирование развития агломерации на основе теории однородных структур

Основной целью моделирования развития городских систем является прогнозирование городского планирования и обеспечения устойчивого развития территорий.

Особенность агломерации в том, что ее нельзя создать: формирование ее определено историческим развитием территории и сети поселений в конкретной географической ситуации. Но для эффективного развития агломераций необходимы государственные ресурсы и управленческое воздействие. Стихийное же развитие (расползание городов) чревато известными негативными последствиями: дорожные пробки, увеличение издержек на содержание существующих и строительство новых дорожных

сетей и инфраструктуры, разрыв в доходах между муниципалитетами на периферии и в центре.

Основной целью моделирования развития городских систем является прогнозирование городского планирования и обеспечения устойчивого развития территорий.

Одной из основных предпосылок, стимулировавших применение ОС-концепции параллельных дискретных систем, явилась настоятельная потребность в достаточно хорошо нормализуемой среде для моделирования процессов пространственного развития городских систем.

Городское развитие можно представить как переход от преимущественно не урбанизированного общества к урбанизированному, которое возможно за счет увеличения существующих городских поселений и за счет развития новых. Люди сосредотачиваются в городских районах в попытке получить лучший доступ к обслуживанию и товарам в целом стремятся к более благоприятным возможностям и более престижной и оплачиваемой работе.

В результате финансовая, социальная, и культурная жизнь расцветает в большом городском пространстве, привлекая все больше и больше населения для работы, производства и потребления социальных благ внутри городского пространства.

В 2007 – 50% мирового населения жили в больших и малых городах, что по оценке составляет более 60 млн. людей двигаются в города ежегодно. Более того, такой размер поступления людей в города будет сохраняться в течении ближайших 30 лет [57, 58].

Изменения в финансовой и социальной активности внутри города, необходимость размещения все прибывающего населения, то есть внутренняя миграция и появление новых и изменение старой социальной активности населения ведет к реорганизации землепользования, необходимости строительства жилых и промышленных, офисных зданий, создание новых зон обслуживания в соответствии с современными требованиями.

Управление развитием агломерацией является одной из наиболее важных и, в тоже время, трудно решаемых задач. Для обеспечения эффективного регулирования городских процессов, связанных с территориальным развитием города, необходимо использовать системный подход и математическое моделирование.

Исследование пространственной организации города реализовано в виде программы-симулятора, основанной на теории однородных структур (ТОС), у истоков которой стояли такие современные кибернетики и математики, как Джон фон Нейман, С. Улам и Э. Мур [1]. Симулятор реализован в виде программного комплекса в среде разработки VBA ArcGIS 9.3.

Однородные структуры представляют собой высоко формализованные модели абстрактных объектов, которые развиваются по простым и всюду одинаковым правилам взаимодействия. Пространство однородных структур (ОС-пространство) представляет собой регулярную решетку, каждая клетка которой представляет некоторый идентифицируемый элемент (элементарную ячейку), которая допускает лишь конечное число состояний [5,6].

Формально однородная структура определяется как упорядоченная четверка компонент

$$OC = \langle Z^d, A, \tau^{(n)}, X \rangle.$$

В качестве примера рассматривается динамика развития территории города Харькова. При моделировании использовались данные, полученные на основании использования аэрофотоснимков, космических снимков современной застройки городской территории и планов исторической застройки города, (рис. 3.9).

Математическая модель имеет следующий вид:

$$M = \langle Z^2, z_{ij}^t, G \rangle,$$

где Z^2 – 2-ОС пространство размерности $n \times n$;

z_{ij}^t – ячейка в ОС- пространстве;

G – множество всех типов объектов, используемых в модели;

i, j – координаты ячейки, $0 \leq i \leq n, 0 \leq j \leq n, n \in N$;

t – время.

Для рассматриваемого примера $N = 10300$.

В начальный момент времени имеется 4 типа объектов: «объект-застройка», «объект железная дорога», «объект реки», «объект дороги (магистральи)».

Обозначим в общем виде множество всех типов объектов, используемых в модели:

$$G = \{g_k^{i_n, j_n} \mid (i_n, j_n) \in Z^2, n \in N, k = \overline{1,4}\},$$

где k – общее количество типов объектов G в начальный момент времени;

(i_n, j_n) – индексы g -го объекта типа G , характеризующие расположение данного объекта в OC -пространстве Z^2 .

Для каждого объекта должно выполняться неравенство:

$$(\forall_{v,w \in N}) g_k (|i_v - i_w| + |j_v - j_w| > 0),$$

которое означает, что каждый объект в OC -пространстве Z^2 имеет отдельную ячейку.

Наиболее вероятностным подходом к рассмотрению хронологической последовательности расширения городской территории является учет ландшафтных особенностей местоположения города. Для обозначения рек, железной дороги, транспортных магистралей и мест, непригодных для строительства по своим топографическим особенностям, где используются «мертвые» зоны – ограниченные участки OC -пространства. В таких «мертвых» зонах невозможно появление объектов застройки. На рис. 3.9 показаны входные данные для пространственного моделирования развития городской территории, полученные в результате векторизации картографической информации и обработки космических снимков средствами геоинформационных технологий.

Функционирование модели осуществляется в дискретной шкале времени $t = 0, 1, \dots$ и определяется локальной функцией перехода ($ЛФП$) $\tau^{(n)}$, которая задает состояние каждому единичному автомату OC -пространства в момент времени t на основе состояний всех соседних ему автоматов в момент времени $(t-1)$. В модели используется классический шаблон соседства Э. Ф. Мура (рис. 3.10).

Более подробно построение алгоритмов моделирования в классических однородных структурах изложено в работах [50, 65].

Функционирование в OC -пространстве выполняется в дискретной шкале времени и определяется $ЛФП$, которые задают состояние каждому единичному автомату структуры в момент времени t на основе состояний всех соседних ему автоматов (в нашем случае согласно шаблону

Э. Ф. Мура) в момент времени $(t-1)$. Другими словами *ЛФП* определяют, по какому правилу участки городского пространства будут изменять свое состояние, следовательно, правила определяют характер процесса развития в данном локальном пространстве.

Такие правила обычно представлены в виде набора продукций «ЕСЛИ-ТО», которые по своей сути достаточно просты. Однако совокупность таких простых конструкций позволяет моделировать сложные процессы пространственного развития городской системы [7].

Некоторые правила в виде продукций «ЕСЛИ-ТО», реализованные в данной модели представлены в таблице 1-3.

С учетом локальных правил 1-3 сценарий развития городского пространства на рассматриваемой территории показан на рис. 3.11. Показано начальное состояние перед началом моделирования (а) результат моделирования, полученный на 353 итерации.

Для проверки адекватности данной модели рассмотрим соответствие результатов, полученных при моделировании, имеющимся планам города Харькова (рис. 3.11), где показаны результаты моделирования динамики городской застройки и картографических данных на период начала XX века и на период 2004 года.

Как видно из приведенного рисунка, данная модель позволяет получить достоверную информацию о динамике роста территории города.

В качестве заключения необходимо отметить, что развитие территории города определяет среду жизнедеятельности населения и потому имеет большое общественное значение. В силу этих обстоятельств, градостроительные проекты должны быть максимально открытыми и получать одобрение со стороны горожан. Для согласования целей и задач градостроительного развития с самыми широкими слоями населения, деловыми кругами и городской властью, необходимо максимально открытое обсуждение генерального плана и всех градостроительных решений [4].

В этих условиях, использование рассмотренных в статье моделей, с учетом имеющихся ресурсных ограничений позволит вырабатывать более адекватные, более целесообразные решения в области стратегического управления развитием территории города.

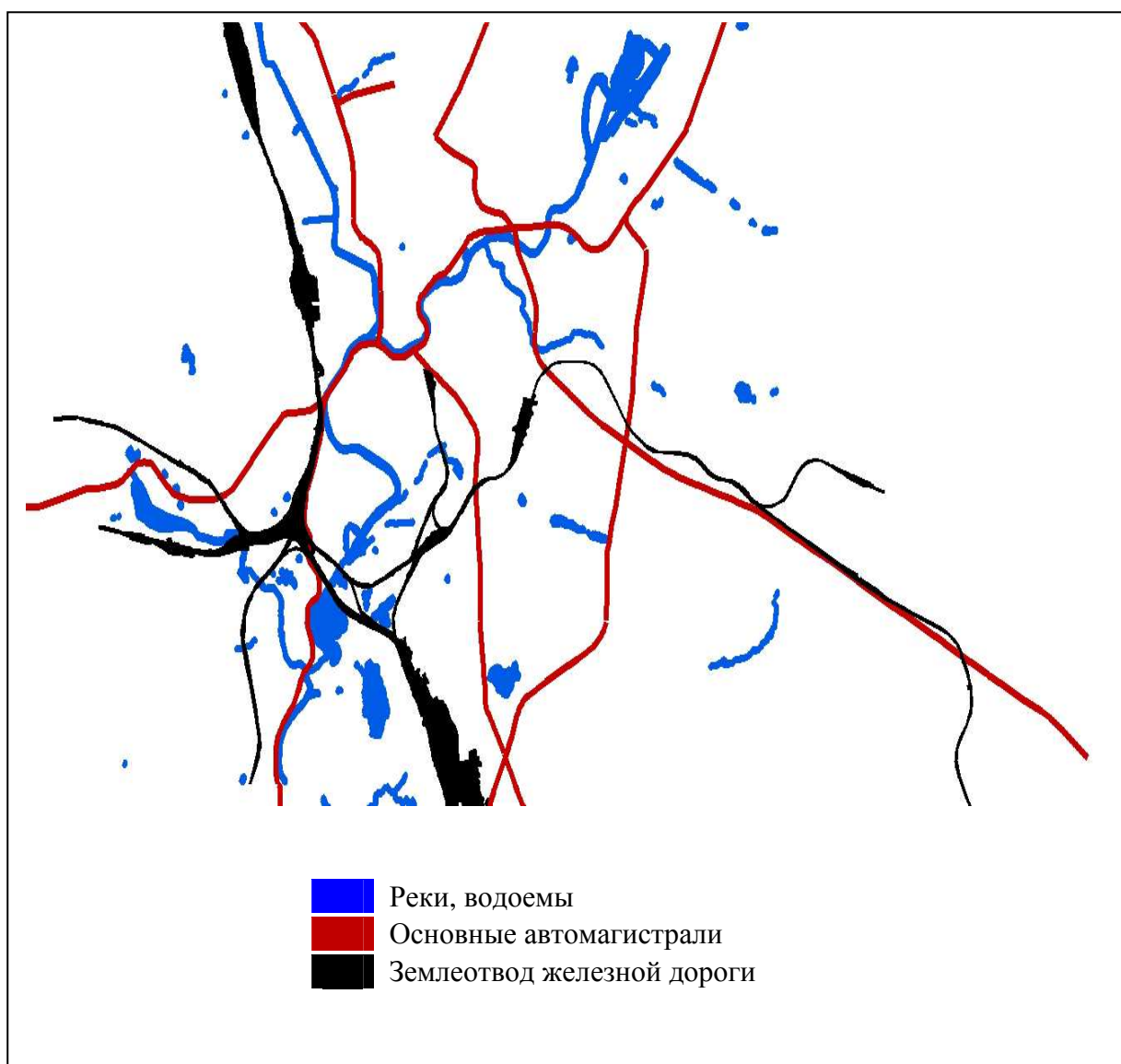


Рис. 3.9 – Входные данные для пространственного моделирования развития городской территории

		-1, 1	0, 1	1, 1	
		-1, 0	0, 0	1, 0	
		-1, -1	0, -1	1, -1	

Рис. 3.10 – Шаблон соседства Э. Ф. Мура

Правило 1

Таблица 1

ЕСЛИ	<i>в шаблоне соседства Мура существует три или более разработанных земельных участка среди земельных участков, принадлежащих пригородной зоне,</i>
ТО	<i>земельные участки, принадлежащие пригородной зоне, будут переведены в состояние, соответствующее состоянию участков городской зоны.</i>

Правило 2

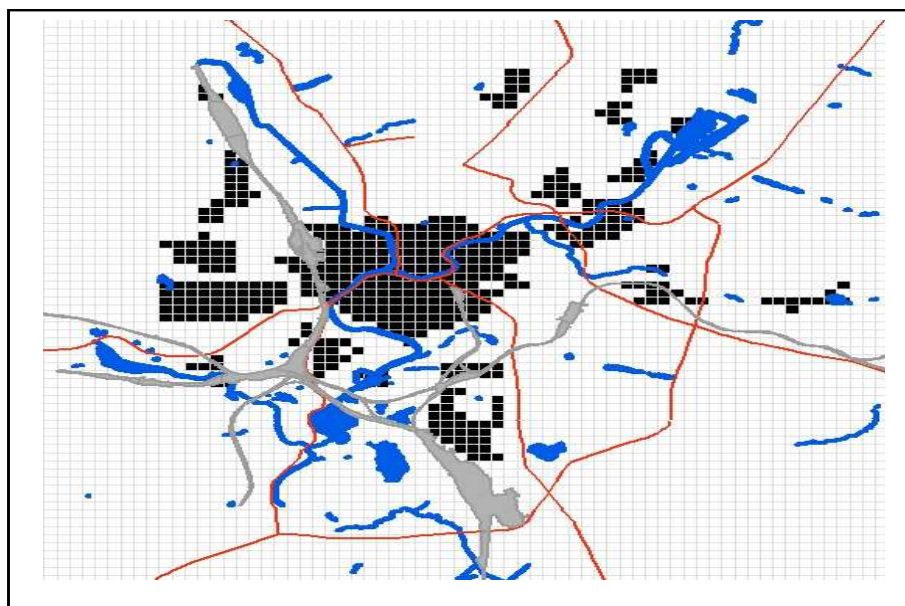
Таблица 2

ЕСЛИ	<i>в шаблоне соседства Мура существует один или два разработанных земельных участка среди земельных участков, принадлежащих пригородной зоне и через них проходит транспортная магистраль,</i>
ТО	<i>земельные участки, принадлежащие пригородной зоне, будут переведены в состояние, соответствующее состоянию участков городской зоны.</i>

Правило 3

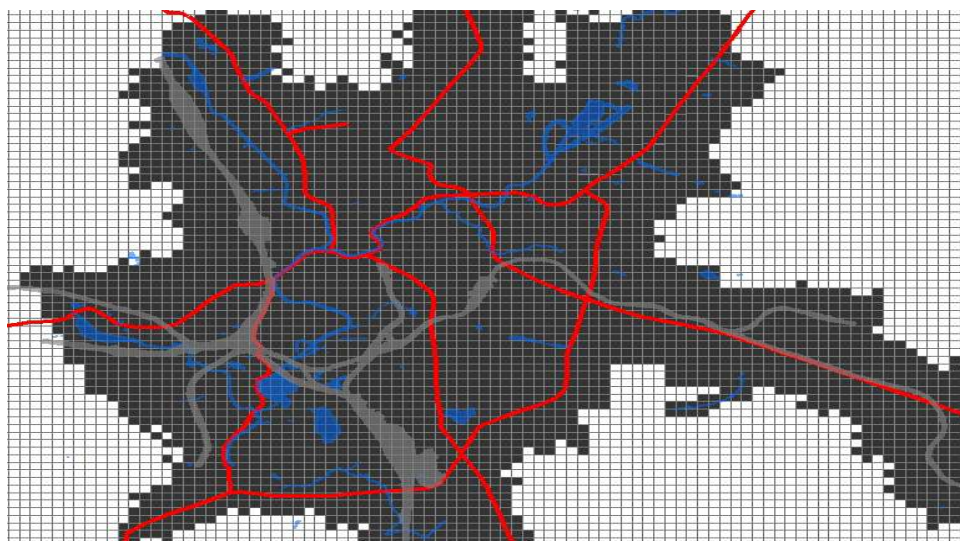
Таблица 3

ЕСЛИ	<i>в шаблоне соседства Мура существует один или два разработанных земельных участка среди земельных участков, принадлежащих пригородной зоне и через них проходит железная дорога,</i>
ТО	<i>земельные участки, принадлежащие пригородной зоне, будут переведены в состояние, соответствующее состоянию участков городской зоны.</i>



- Реки, водоемы
- Основные автомагистрали
- Землеотвод железной дороги
- Застройка города и поселений начала XX века

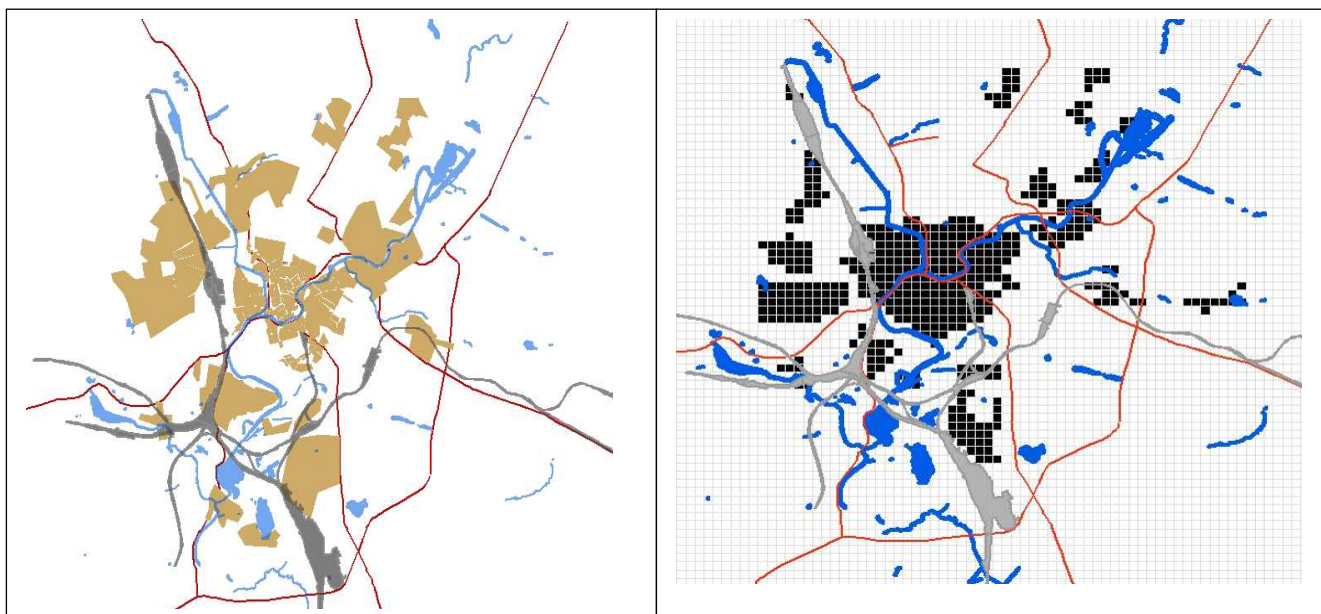
а)



- Реки, водоемы
- Основные автомагистрали
- Землеотвод железной дороги
- Застройка города и поселений начала XX века

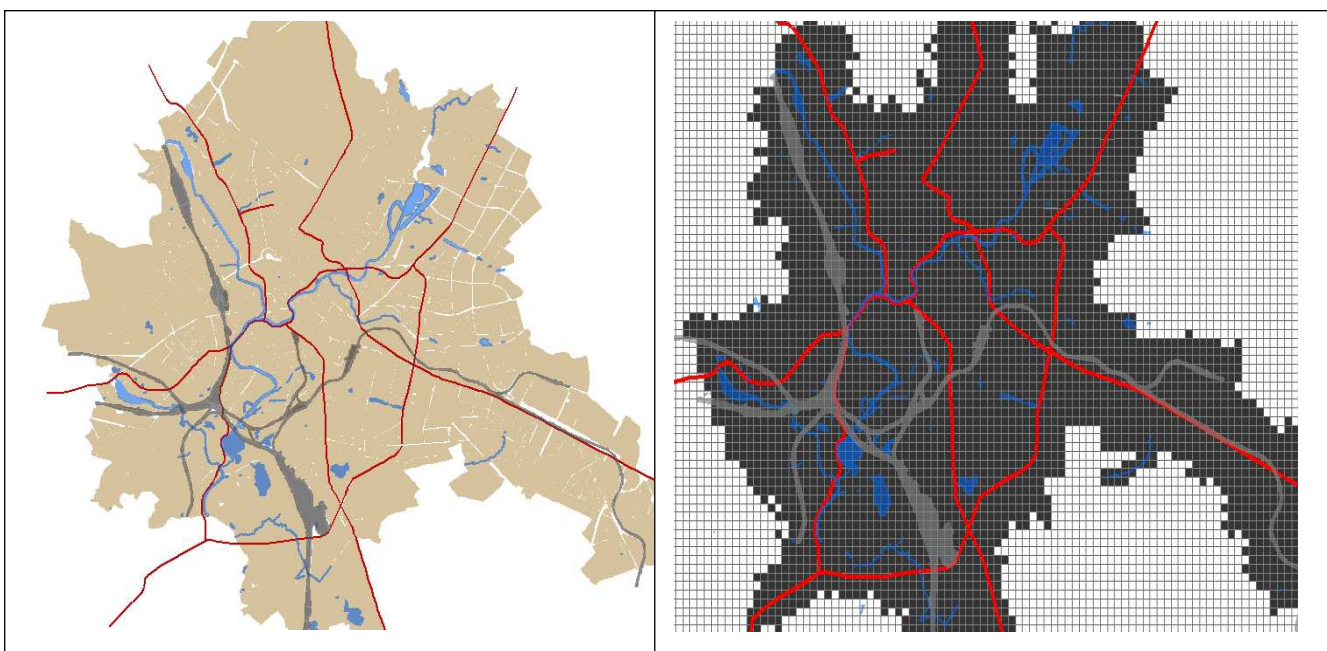
б)

Рис. 3.11 – Начальное состояние (а) и результат (б) моделирования развития городской территории с использованием однородных структур



а)

б)



в)

г)

Рис. 3.12 – Сравнение результатов моделирования динамики городской застройки и картографических данных в различные моменты времени:
а) застройка города на начало XX века и (б) ее представление в модели;
в, г) 2004 год и модель, полученная на 353 итерации

3.5.2 Моделирование движения пешеходов в городских условиях

Невозможно эффективно спланировать транспортный узел или массовое мероприятие, проводимое в городских условиях, без знаний о поведении пешеходов. Поведение пешеходов является сложным феноменом, поэтому необходимо использовать имитационное моделирование при планировании мероприятий и объектов с высокой плотностью пешеходов и ограниченным пространством для оптимизации потока пешеходов и гарантированного предотвращения давки в случае паники.

Новое, недавно возникшее направление в имитационном моделировании – так называемое агентное (мультиагентное) моделирование (“agent-based modeling”), имеет свои особенности. Агентная модель представляет реальный мир в виде многих отдельных активных подсистем, называемых агентами. Каждый из агентов взаимодействует с другими агентами, которые образуют для него внешнюю среду, и в процессе функционирования может изменить как внешнюю среду, так и свое поведение [1].

Движение пешеходов в городских условиях не менее сложно, чем движение потока автомобилей. Пешеходы более гибкие, чем автомобили, и они не имеют «правил дорожного движения». Для описания потока пешеходов в городе обычно используют регрессионные модели [2]. Однако регрессионные модели не позволяют представить такие явления как взаимодействие между пешеходами во время движения и их реакцию на объекты городской инфраструктуры.

Агентным моделированием трафика пешеходов занимаются исследователи с конца 70-х годов и существенно активизировались исследования в течение последних двух десятилетий. В работах [3, 4] были предложены основные поведенческие принципы, которым следуют пешеходные агенты при движении по городу:

- путь агента-пешехода (объекта) близок к кратчайшему, соединяюще-му точки начала и окончания движения;
- агенты-пешеходы (объекты) избегают столкновения с неподвижным препятствиями (объектами городской среды);
- агенты-пешеходы (объекты) избегают резкого и быстрого изменения направления своего движения;
- агенты-пешеходы (объекты), как правило, ходят по сторонам дороги (тротуарам) и не приближаются к стенам слишком близко.

Основное требование для любой формализации пешеходного поведения, чтобы заставить агентов избежать столкновения, как есть в реальной жизни. В работе [4] введено новое понятие силы отталкивания Θ между пешеходами, которая возникает при приближении пешеходов-агентов. Функция, которая используется для определения силы отталкивания достаточно проста и имеет вид:

$$\Theta = 1 / ((D - 0,4)^2 + 0,015),$$

где D – это дистанция, разделяющая агентов-пешеходов (в метрах),
 $0,4$ – диаметр, определяющий минимальное расстояние между пешеходами-агентами,
 $0,015$ – константа, позволяющая избежать бесконечного роста силы отталкивания Θ .

На рис. 3.13 изображена модель процесса столкновения двух пешеходов во времени. Процесс столкновения состоит из четырех основных факторов:

- пешеходный агент A движется в нужном направлении (по направлению к следующей контрольной точке) с желаемой скоростью v_A ;
- здания, стены, улицы и другие границы препятствуют движению пешеходных агентов;
- другие пешеходы-агенты влияют на движение пешехода через силу отталкивания Θ .

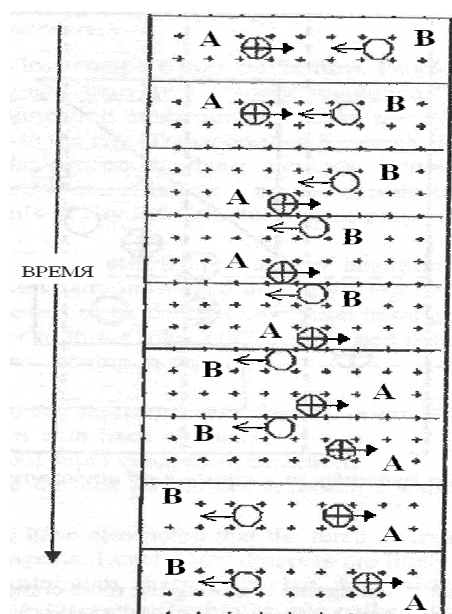


Рис. 3.13 – Модель процесса столкновения между пешеходами-агентами

На основании данной модели построен двунаправленный поток пешеходов-агентов, движущихся по улице. В модели предусматривается два режима: если дорожка заполнена случайными переходами, следовательно, пешеходы объединятся в единый поток и определенную сторону (например, вправо), таким образом, образуются две группы пешеходов, движущиеся в смежных направлениях по разным полосам движения. Другой вариант предусматривает менее организованных пешеходов. Одним из примеров является хаотично движущаяся толпа, где пешеходы двигаются через толпу, не образуя отдельные полосы движения направленного потока пешеходов.

На рис. 3.14 показана блок-диаграмма данных и процессов для моделирования движения пешеходов в городских условиях. Блок-диаграмма отражает интеграцию модели движения пешеходов в городских условиях с геоинформационными системами. Разработанное городское геоинформационное пространство позволяет размещать пешеходов-агентов в геопространственной среде, которое задается в виде базы геоданных.

Структура базы геоданных включает слои зданий и их атрибуты, улично-дорожную сеть, парковки, транспортные узлы, социально-экономические данные (плотность населения). Интеграция модели движения пешеходов и городского геоинформационного пространства дает возможность получения информации о текущем местоположении моделируемых объектов, перемещении пешеходов-агентов из текущего местоположения в новое с заданной скоростью, выполнение анимации агентов (статической или движущейся), установления связей между агентами в зависимости от их расположения.

На рис. 3.15 показан фрагмент городского геоинформационного пространства (транспортный узел), который представлен в модели движения пешеходов в виде базы геоданных. Транспортный узел содержит остановки метро, основные остановки маршрутных автобусов и электротранспорта, соединенные между собой основными направлениями движения пешеходов-агентов.

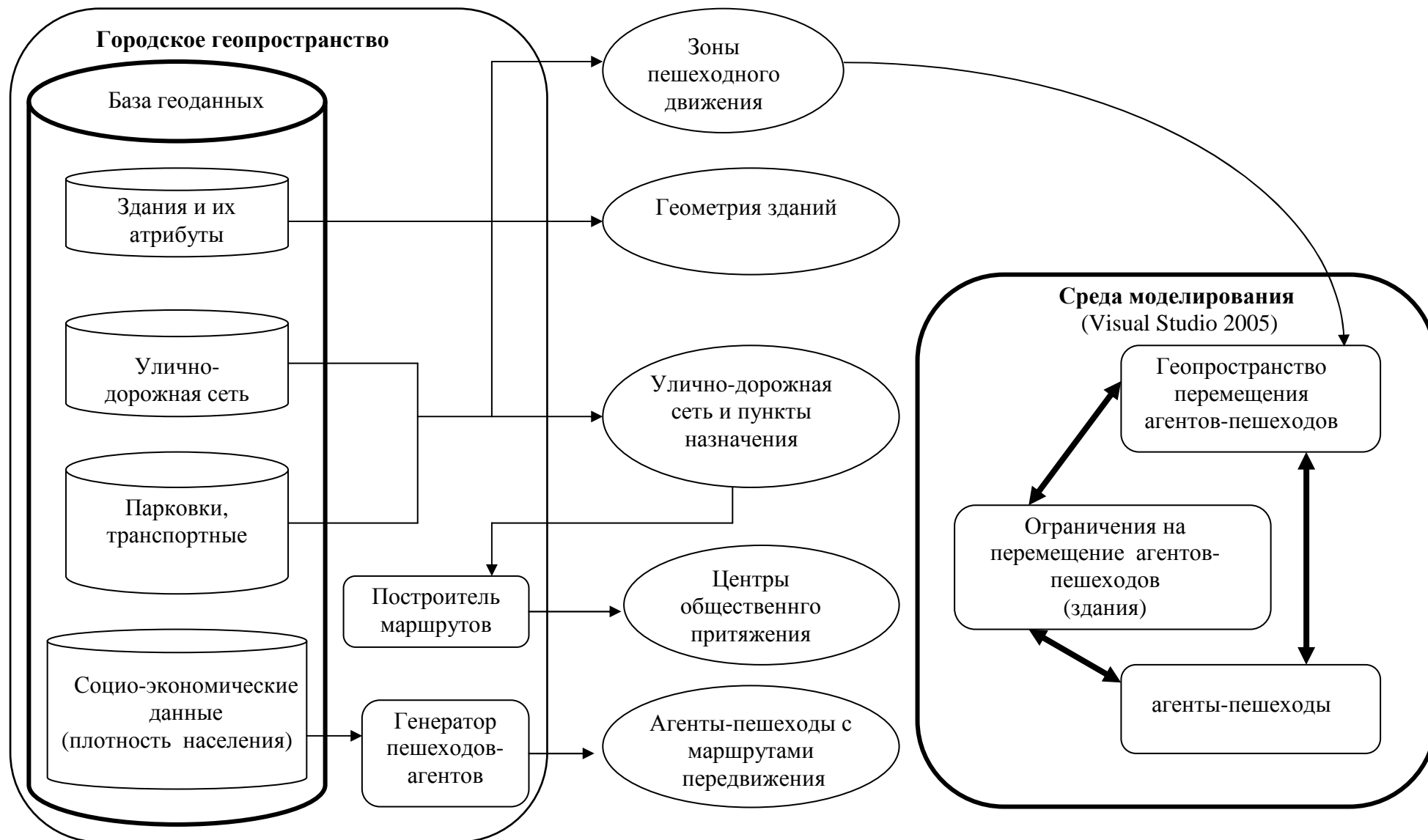


Рис. 3.14 – Блок-диаграмма данных и процессов для моделирования движения пешеходов в городских условиях

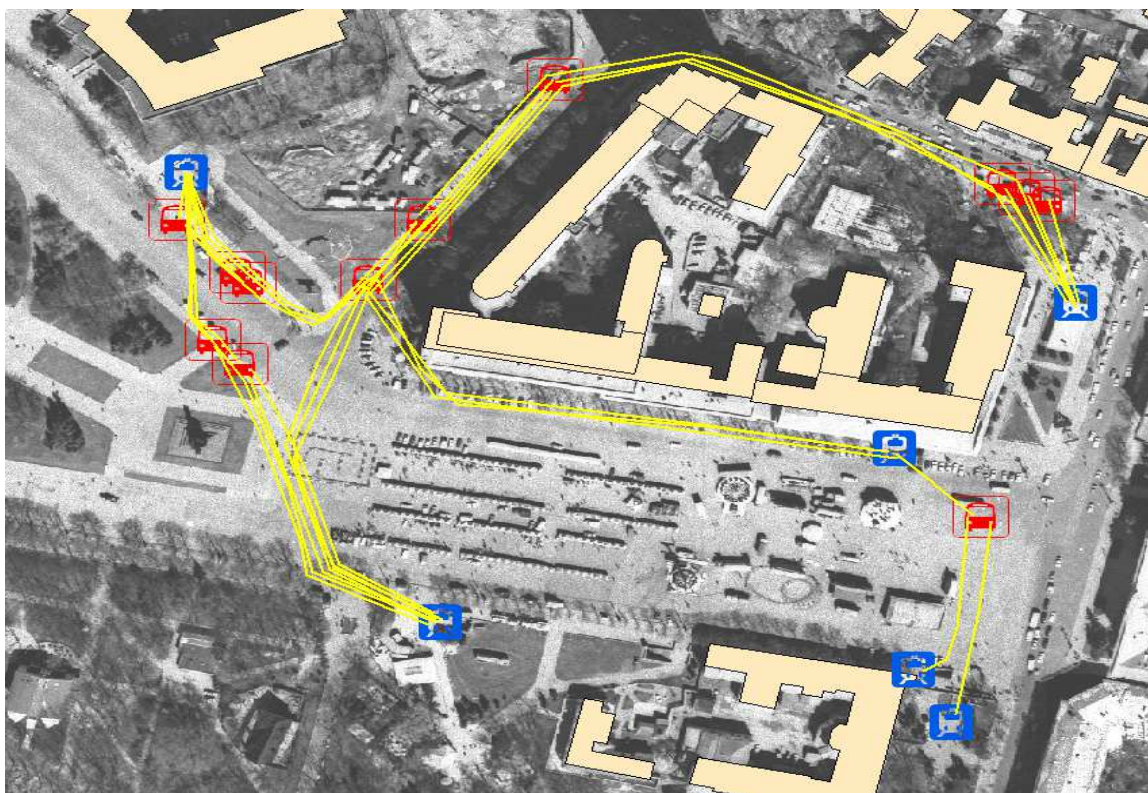


Рис. 3.15 – Фрагмент городского геоинформационного пространства (транспортный узел)

Для моделирования трафика пешеходов-агентов на кафедре геоинформационных систем и геодезии разработана программа на объектно-ориентированном языке в среде Visual Studio 2005. Обмен геопространственными данными между средой моделирования и базой геоданных реализован в формате XML. Программа позволяет создавать и проводить эксперименты на основе агентного моделирования движения пешеходов в городских условиях. Созданная программа носит экспериментально-научный характер и поэтому не удовлетворяет критериям коммерческого программного обеспечения.

Существует значительное количество коммерческих программ для моделирования потоков пешеходов, такие, как Vissim, SimWalk, Anylogic и т.д. Несмотря на очевидно превосходство этих программ над собственной разработкой, необходимо отметить, что при разработке собственной модели с «нуля», разработчик получает полный контроль как над моделью, так и над проведением экспериментов, сам определяет дальнейшие направления развития, закладывает базу под дальнейшие возможные коммерческие разработки, исключает зависимость от какой-либо компании.

Разработана программная среда для создания, модификации, исполнения и отладки имитационной модели потоков пешеходов на основе агентного моделирования. Создан графический интерфейс пользователя, который позволяет легко осуществлять операции над моделью. Интеграция со средствами ГИС позволяет непосредственно наблюдать за движением пешеходов и событиями.

Полученная имитационная модель может представлять практическую пользу для ученых и инженеров, заинтересованных в моделировании движения пешеходов. С её помощью возможно исследование и анализ городской среды с целью прогнозирования поведения пешеходов на массовых мероприятиях и в транспортных узлах.

В настоящее время производится доработка и совершенствование программного продукта с целью превращения его в действующий макет с адаптацией к различным предметным областям, где участвуют подвижные во времени и пространстве объекты и процессы.

Выводы

В этой главе рассмотрены методологические основы построения моделей, основанных на использовании концепции однородных структур и некоторые вопросы применения данной концепции для решения задач моделирования динамики градостроительных систем. Основной целью настоящего исследования является формулировка компьютероподобных моделей, позволяющих моделировать не только общие феноменологические аспекты нашего мира, но и пространственно-временные изменения в землепользовании и планировочной структуры территории.

Модели, которые явным образом сводят макроскопические явления к точно определенным микроскопическим процессам, представляют наибольший методологический интерес, потому что такие модели обладают огромной убедительностью и ясностью.

4. РАЗВИТИЕ КОНЦЕПЦИИ ОДНОРОДНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ

*Если молоток в руках единственный инструмент,
то все тебе покажется как гвозди.*

Лотфи Заде

Любая городская система это динамично развивающаяся система, которая быстро наращивает своеобразную конфигурацию экономического, демографического, культурного, организационного потенциала роста, детерминируя полифункциональность, многопрофильность развития его жизнедеятельности, а также влечет за собой смену традиционных форм занятости и повседневных практик горожан на более многообразные.

Таким образом, город можно представить как взаимодействие различных факторов, которые интегрируются в три основные группы: физические, социально-экономические и технические. Существует достаточно большое количество моделей, которые рассматривают различные аспекты развития функционально-пространственной структуры городских систем [1, 2, 3, 3].

Однако, большинство этих подходов рассматривают городское развитие как бинарный процесс, то есть как процесс преобразования не городской территории в городскую, основываясь теоретико-множественном подходе.

Фактически, процесс городского развития имеет сходство с нечеткими процессами в пространственном и временном отношениях. В пространственном отношении не существует четких границ между городской застройкой, пригородной зоной и землями сельскохозяйственного назначения.

Во временном отношении процесс функционально-пространственного развития представляет собой непрерывный процесс, который может быть описан в виде лингвистических переменных [1, 2, 3, 4].

В разделе рассмотрены некоторые вопросы, связанные с совершенствованием концепции *ОС*-подхода на основе нечетких множеств для разработки вычислительной среды моделирования функционально-пространственного развития градостроительной системы. Территория населенных пунктов представлена на основе нечетко-множественного подхода. Функция принадлежности нечеткого множества используется для определения пространственно-временных характеристик процесса урбанизации. Описаны примеры локальных функций переходов, которые переводят состояние единичных ячеек *ОС*-пространства из одного состояния в другое, основываясь на нечеткой логике, которая в свою очередь, определяет недетерминистическую природу сил, побуждающих градостроительную систему к функционально-пространственному развитию.

В п. 4.1 рассмотрены основные понятия нечетких множеств, их характеристика, а также возможность применения нечетко-множественного подхода к определению состояния ячеек моделируемого *ОС*-пространства.

В п. 4.2 рассмотрен математический аппарат нечеткой логики. Здесь же показана возможность применения аппарата нечеткой логики в моделировании процесса развития городской системы. Далее следует п. 4.3, в котором демонстрируется применение математического аппарата нечеткой логики для управления состоянием клеточных автоматов с целью моделирования процесса городского развития.

Здесь же обсуждаются вопросы процедуры дефаззификации результатов моделирования функционально-пространственного развития городской системы и сделаны выводы о возможности разработки вычислительной среды на основе применения математического аппарата нечеткой логики и нечетких множеств для моделирования развития как градостроительных так и региональных систем.

4.1 Процесс городского развития и формализмы теории нечетких множеств

Городское развитие можно рассматривать как процесс физической концентрации населения, жилой и промышленной застройки территории. Это непрерывный процесс в пространстве и времени, который по своей сути и пространственно и во времени является нечетким как по своим характеристикам так и по факторам, которые в свою очередь влияют на управление процессом развития города.

Хотя нечеткие множества и нечеткая логика широко применяется при решении различных задач, связанных с анализом сложных систем и процессов принятия решений с конца 60-х годов прошлого века, понимание городского развития как нечеткого процесса остается в настоящее время на уровне декларации.

Нечеткий характер факторов урбанизации, таких, как демографический, экономический, экологический, градостроительно-планировочный предполагают применение нечетко-множественного подхода при моделировании процессов развития и планирования городских территорий.

4.1.1 Нечетко-множественное моделирование пространственных границ урбанизированных территорий

Традиционно для представления границ любых географических процессов, явлений используются тематические карты. Тематические карты обычно используются для представления объектов реальности, которые характеризуются местоположением и набором свойств, характеристик, атрибутов (позиционных и непозиционных пространственных данных соответственно).

Тематические карты используют категории, которые позволяют применять классическую теорию множеств, где каждому местоположению объекта соответствует единственная категория, а границы между различными категориями имеют топологическую, четко выраженную форму.

Такое представление пространственных объектов может иметь место когда речь идет о создании кадастровых систем, когда необходимо отобразить сведения о переписи населения или необходимо указать административные или государственные границы, то есть такое представление пространственных объектов может быть использовано, если необходимо указать четкое разграничение между ними.

К сожалению, такой подход не всегда можно применить для представления границ между объектами, которые имеют непрерывное изменение своих параметров и характеристик. К таким пространственным объектам можно отнести, например, границы между агропроизводственными группами почв, границы зон охраняемого природного ландшафта, зон ценного археологического слоя, плотность населения, потому что границы между такими пространственными объектами не имеют четко выраженных границ.

В таком случае, представление географических границ, основанное на теории множеств, может привести к неправильному пониманию существующей информации о предметной области.

Как и во многих динамических процессах географических явлений, процесс городского развития представляет собой непрерывный процесс диффузии в пространстве и времени.

В пространственном отношении городскую территорию можно представить как высокую концентрацию жилой застройки и доминирование земель не сельскохозяйственного использования.

В таком случае получаем нечеткое определение городской территории, так как существует многообразие в различии и степени концентрации проживающего населения на городской территории, а так же протяженность земель не сельскохозяйственного назначения для территорий, которые могут рассматриваться как городские. Кроме того, с учетом преимущественного функционального использования территория города подразделяется на селитебную, производственную и ландшафтно-рекреационную.

Селитебная территория предназначена: для размещения жилищного фонда, общественных зданий и сооружений, в том числе научно-исследовательских институтов и их комплексов, а также отдельных коммунальных и промышленных объектов, не требующих устройства санитарно-защитных зон; для устройства путей внутригородского сообщения, улиц, площадей, парков, садов, бульваров и других мест общего пользования.

Производственная территория предназначена: для размещения промышленных предприятий и связанных с ними объектов, комплексов научных учреждений с их опытными производствами, коммунально-складских объектов, сооружений внешнего транспорта, путей внегородского и пригородного сообщений.

Ландшафтно-рекреационная территория: включает городские леса, лесопарки, лесозащитные зоны, водоемы, земли сельскохозяйственного использования и другие угодья, которые совместно с парками, садами, скверами и бульварами, размещаемыми на селитебной территории, формируют систему открытых пространств.

Все городские территории окружены сельскохозяйственными или естественными, то есть природными землями, где нет четких границ между застроенной территорией и ее окружением.

Между территориями, которые характеризуются как городского назначения и сельскохозяйственного назначения существует зона перехода в землепользовании, социальных и демографических характеристик, лежащих между – а) плавнорегулируемой зоной застройки и пригородными зонами центрального городского района и – б) сельскохозяйственной глубинкой, которая характеризуется полностью отсутствием несельскохозяйственного жилья и несельскохозяйственного землепользования [25, 34,37]. Эта «зона перехода» и есть место, где и городские и не городские характеристики территории пересекаются и имеют определение как «пригород».

Такой район становится основной частью при эволюции роста города и являются наиболее привлекательными при исследовании развития города.

Тем не менее, различные концепции терминологии появляются в литературе, такие как ПРИГОРОД, ОКРЕСТНОСТЬ, ГОРОДСКАЯ ОКРАИНА, ВНУТРЕННЯЯ или ВНЕШНЯЯ ГРАНИЦА ГОРОДА.

Это в значительной степени усложняет понимание пространственной формы города и социально-экологических характеристик непрерывно изменяющейся природы развития, так же, как меняется и протяженность развития градостроительной системы в пространстве.

Очевидно, что терминология, которая используется, неочевидна, потому и делает изучение пространственной структуры городской системы очень сложной и несопоставимой.

С временной точки зрения, если территория была разработана от одного состояния (не городского) к другому (городской) в пределах определенного промежутка времени, то разработка фактически велась непрерывно в пределах этого периода.

Следовательно, трудно и даже неверно определять точно точку отсчета, когда фактически начали возникать изменения в городской структуре.

В отличие от четкой теории множеств, где местоположение в пространстве или принадлежит конкретной категории или не принадлежит вовсе, теория нечетких множеств позволяет иметь частичную принадлежность к той или иной категории, которая характеризуется степенью принадлежности в этом нечетком множестве.

В следующем разделе терминология и нечеткомножественный подход будут использованы для определения урбанизированных и не урбанизированных территорий.

4.1.2 Некоторые понятия нечетких множеств

Теория нечетких множеств представляет собой некоторый аппарат формализации одного из видов неопределенности, возникающей при моделировании реальных процессов, явлений, объектов. Нечеткость возникает всегда, когда используются слова естественного языка для описания ситуаций, возникающих в условиях реальной обстановки. Обычно нечеткость возникает при попытке применить информационные технологии в «нетрадиционных» или «гуманитарных» областях, таких как экономика, управление, социология.

Само понятие «неопределенность» является сложной философской категорией. На уровне понятия можно привести следующую классификацию неопределенности (рис. 4.1). Отметим, что разные типы неопределенности имеют свои средства поддержки обработки информации, обладающие данным типом неопределенности.

Физическая неопределенность описывает неопределенность объектов реального мира с точки зрения наблюдателя. Теория вероятностей имеет дело с неопределенностью некоторых событий. Теория вероятностей, имеющая более 200-летнюю историю, представляет собою наиболее развитую теорию, ориентированную на обработку неопределенности.

Особенностью неопределенности вероятностного типа является: необходимость повторяемости событий; наблюдаемые эффекты должны быть перенесены на все объекты или события данного типа (генеральную совокупность); независимость наблюдаемых событий.

Теория формальных грамматик изучает неопределенность смысла фраз. Язык формальных грамматик удобен для решения ряда практических задач, возникающих в рамках распознавания образов [45].

В повседневной жизни обычно используются такие понятия, как *большой, малый, хороший, простой, сложный, удобный* и т. д., которые являются нечеткими, расплывчатыми, однако эта неопределенность не носит вероятностного характера. Теория нечетких множеств разработана для оперирования с такого рода объектами.

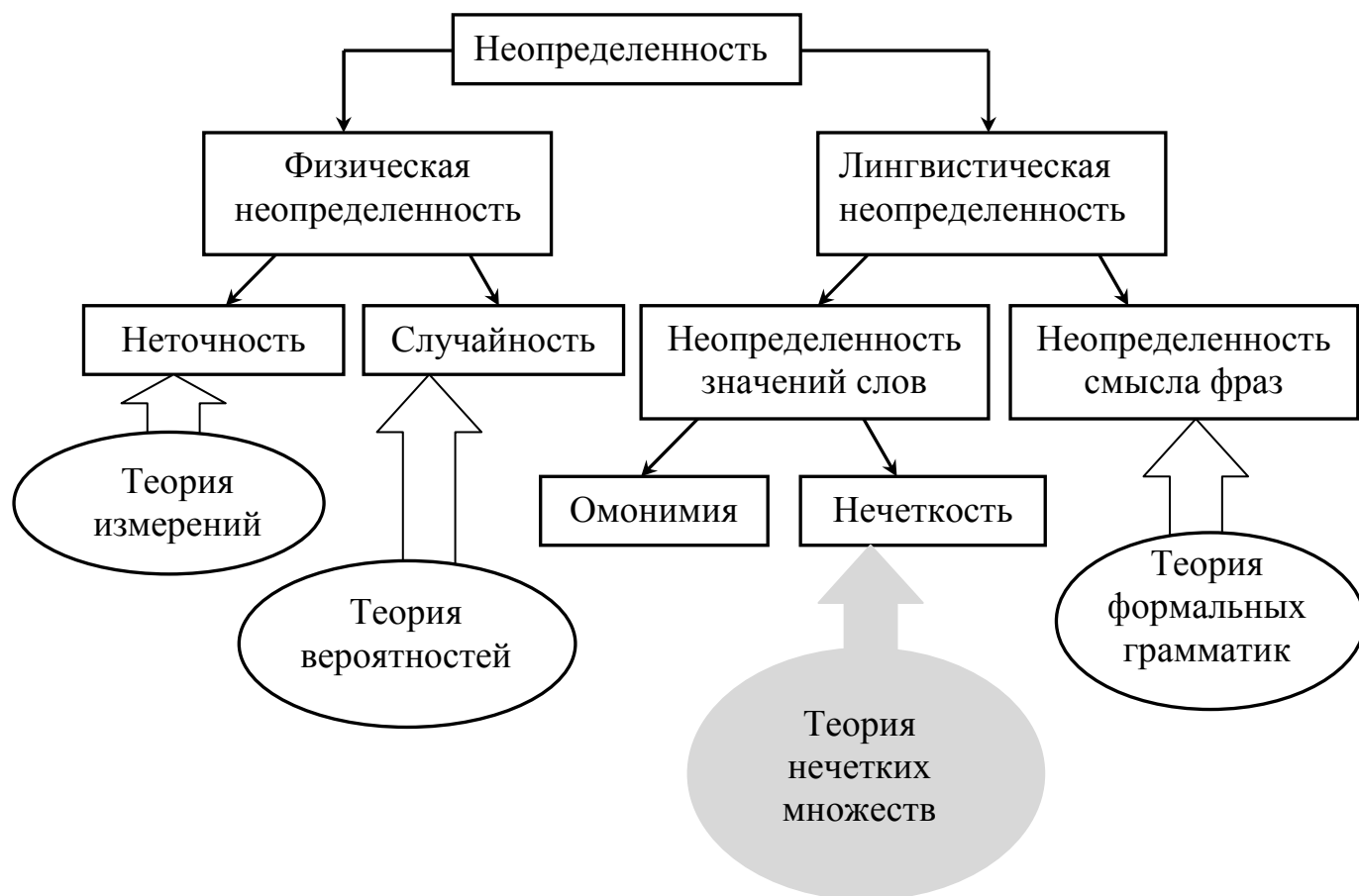


Рис. 4.1 – Типы неопределенности и теоретические подходы к их разрешению

В классической теории множеств под множеством понимается множество различных объектов (предметов или понятий), рассматриваемых как одно целое. Множество может быть замкнутым и незамкнутым, полным и пустым, упорядоченным и неупорядоченным, счётным и несчётным, конечным и бесконечным.

Каждый элемент (объект) множества может или принадлежать или не принадлежать данному множеству. Принадлежность элемента (объекта) основывается на правилах и выражениях булевой логики. Согласно четкой теории множеств, городская территория может быть определена как объект, который имеет четко выраженную границу, отделяющую городскую территорию от прочих земель (не городской территории).

Решение включения или не включения определенной территории в тот или иной класс (кластер) обычно принимается на основе выбранных каких-либо критериев. Однако такой критерий может быть трудно определить в действительности.

Теория нечетких множеств как расширение классической теории множеств была предложена Лотфи Заде в 60-х годах XX века [62].

В основе понятия нечеткого множества (в литературе часто используется понятие *fuzzy set* – “размытого множества”) лежит представление о том, что составляющие данного множества элементы, обладающие общим свойством, могут обладать этим свойством в различной степени и, следовательно, принадлежать к данному множеству с различной степенью. При таком подходе высказывания типа “такой-то элемент принадлежит данному множеству” теряют смысл, поскольку необходимо указать “насколько сильно” или с какой степенью конкретный элемент удовлетворяет свойствам данного множества.

Более точное определение нечеткого множества может быть сформулировано следующим образом.

Пусть X универсальное множество, элементы которого обозначим как x . Тогда запишем $X = \{x\}$. Нечеткое множество A представляет собою множество упорядоченных пар

$$A = \{ (x, \mu_A(x)) \mid x \in X \},$$

где $\mu_A(x)$ представляет собою функцию принадлежности, которая характеризует степень принадлежности элемента x множеству A . Функция $\mu_A(x)$ принимает значения в некотором линейно упорядоченном множестве M .

Множество M называется множеством принадлежности, где в качестве значений множества M выбирается отрезок $[0,1]$. Если элементами множества M являются 0 или 1, то есть $M = \{0,1\}$, то нечёткое множество может рассматриваться как обычное, чёткое множество.

Если нечеткое множество A определено на конечном универсальном множестве $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$, то его удобно обозначать следующим образом:

$$A = \frac{\mu_A(x_1)}{x_1} + \frac{\mu_A(x_2)}{x_2} + \dots + \frac{\mu_A(x_n)}{x_n} = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_A(x_i)}{x_i},$$

где $\frac{\mu_A(x_i)}{x_i}$ – пара «функция принадлежности» / «элемент», называемая *синглтоном*, а «+» – обозначает совокупность пар.

Рассмотрим пример: пусть $X = \{1, 2, 3, \dots, 10\}$, тогда нечеткое множество «большие числа» может быть представлено следующим образом:

$$A = \text{«большие числа»} = 0,2/6 + 0,5/7 + 0,8/8 + 1/9 + 1/10.$$

Это следует понимать следующим образом: 9 и 10 с абсолютной уверенностью отнести к «большим числам», 8 – есть «большое число» со степенью 0,8 и т.д. Соответственно, числа 1, 2, ..., 5 абсолютно не являются «большими числами».

На практике удобно использовать кусочно-линейную аппроксимацию функции принадлежности нечеткого множества, как это показано на рис. 4.2, так как требуется только два значения \underline{a} и \bar{a} .

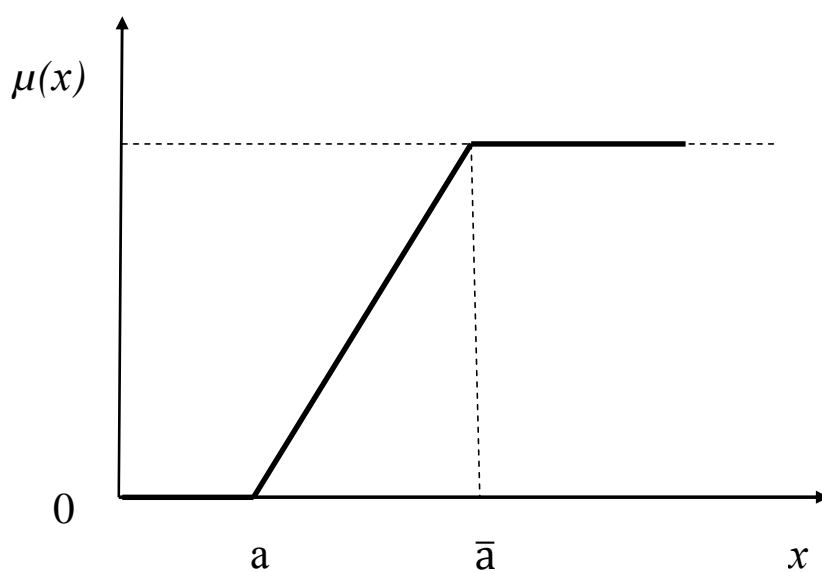


Рис. 4.2 – Функция принадлежности нечеткого множества

Рассмотрим основные свойства нечетких множеств.

1. Нечеткое множество $A \subseteq X$ пустое, то есть $A = \emptyset$, если $\mu_A(x) = 0$, $\forall x \in X$.
2. Нечеткие множества A и $B \subseteq X$ эквивалентны, то есть $A=B$, если

$$\mu_A(x) = \mu_B(x), \quad \forall x \in X.$$

3. Нечеткое множество $A \subseteq X$ является подмножеством нечеткого множества $B \subseteq X$, то есть $A \subseteq B$, если $\mu_A(x) \leq \mu_B(x)$, $\forall x \in X$.

Для наглядности рассмотрим простой пример. Пусть $X = \{1, 2, 3\}$.

$$A = 0,3/1 + 0,5/2 + 1/3,$$

$$B = 0,4/1 + 0,6/2 + 1/3.$$

Тогда $A \subseteq B$.

Кардинальное число (мощность) нечеткого множества

$$A = \frac{\mu_A(x_1)}{x_1} + \frac{\mu_A(x_2)}{x_2} + \dots + \frac{\mu_A(x_n)}{x_n} = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_A(x_i)}{x_i}$$

находится следующим образом:

$$\text{card } A = |A| = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_A(x_i)}{x_i}.$$

Пример. Если $X = \{1, 2, 3\}$ и $A = 0,4/2 + 0,7/3 + 1/4$, то $\text{card } A = 2,2$.

Рассмотрим город в контексте регионального и муниципального развития.

Изменение использования территорий, их перевод из зон временного (сезонного) проживания в жилые зоны будет способствовать поэтапному их обустройству, включая формирование улично-дорожной сети, объектов обслуживания, прокладку инженерных сетей (водопровод, канализация, газопровод), организацию вывоза и складирования бытовых отходов, благоустройство земельных участков общего пользования.

Помимо феномена социальной сегрегации в крупных агломерациях, которая остается важной проблемой многих регионов мира, можно наблюдать появление в городском теле «дыр» — старых и покинутых промышленных зон; плохо оборудованных территорий; территорий, находящихся в стороне от общественного транспорта; зон, отталкивающих инвесторов сложностями межевания, дефектами формы, размеров и ландшафта земельных участков.

Временной аспект развития городского пространства похож на процесс развития в пространстве. Если территория была преобразована из состояния, например, пригородной зоны к высоко урбанизированной территории в течение определенного периода, то процесс развития можно представить как непрерывный процесс в течение этого периода времени. Таким образом, в этот промежуток времени городская территория могла находиться в состоянии частичной разработанности.

Пространство и время приводят в гармоничный порядок использование заложенного потенциала города для его дальнейшего развития. Пространство и время являются неразделимыми данными территориального анализа. Бесконечное множество пространств (которые находятся в движении во времени по отношению друг к другу) и временной фактор составляют систему координат в том смысле, что на границах со сферой неиспользованного потенциала и пространство и время

находятся в состоянии ожидания процессов развития городской территории.

Для иллюстрации степени развития городской системы в пространстве и во времени, рассмотрим понятия урбанизированной и не урбанизированной территории на основе теории нечетких множеств.

Пусть X это совокупность ячеек (однородных клеточных автоматов), представляющих некоторую территорию, где x_{ij} есть элементарная ячейка с координатами i, j и принадлежит множеству X .

Нечеткое множество S_{urban} , которое характеризует урбанизированную территорию, может быть представлено как множество упорядоченных пар

$$S_{urban} = \{ (x_{i,j}, \mu_{S_{urban}}(x_{i,j})) \mid x_{i,j} \in X \},$$

где $\mu_{S_{urban}}(x_{i,j})$ функция принадлежности, которая характеризует принадлежность участка $x_{i,j}$ нечеткому множеству S_{urban} .

Такая функция принадлежности представляет степень развития городской территории. Таким же образом, нечеткое множество S_{non_urban} представляет неработанную, то есть не урбанизированную территорию, и может быть представлено в виде:

$$S_{non_urban} = \{ (x_{i,j}, \mu_{S_{non_urban}}(x_{i,j})) \mid x_{i,j} \in X \},$$

где $\mu_{S_{non_urban}}(x_{i,j})$ другая функция принадлежности, которая указывает на степень принадлежности элемента городской территории (участка) $x_{i,j}$ нечеткому множеству S_{non_urban} .

Функция принадлежности или иными словами характеристическая функция показывает, как и в какой степени элемент нечеткого множества принадлежит пространству рассуждений. Это традиционный способ представления информации о том, какие объекты являются элементами множества. Если некоторый объект является элементом множества, то его функция принадлежности равна 1, если объект не является элементом множества, то его функция принадлежности равна 0.

Применение функции принадлежности позволяет описывать ситуации, которые складываются в реальном мире.

На практике удобно использовать те функции принадлежности, которые допускают аналитическое представление в виде некоторой простой математической функции. Это упрощает не только соответствующие численные расчеты, но и сокращает вычислительные

ресурсы, необходимые для хранения отдельных значений этих функций принадлежности.

В контексте городского или регионального развития функция принадлежности характеризует потенциал, с которым участвует каждый единичный элемент ОС-пространства в процессе градостроительного развития.

На рис. 4.3 показаны две линейные функции принадлежности, одна характеризует степень принадлежности ОС-пространства к урбанизированной территории, другая функция принадлежности характеризует степень принадлежности ОС-пространства к не урбанизированной территории.

Например, если участок территории соответствует значению функции принадлежности 0,7, то такая территория будет иметь уровень разработанности и уровень урбанизации выше, чем участок, который соответствует значению функции принадлежности 0,3. Соответственно, для участка территории со значением функции принадлежности 0,8, уровень урбанизации будет меньше, чем для территории с соответствующим значением функции принадлежности 0,4. Используя данную терминологию, граница между этапами развития территории может быть представлена не как четкая линия, а как область территории с непрерывно изменяющимся значением функции принадлежности рассматриваемого нечеткого множества.

Как видно из вышеизложенных рассуждений, функция принадлежности является ключевой компонентой нечеткого множества. Различные функции принадлежности представляют различные нечеткие множества, даже несмотря на их относительную похожесть.

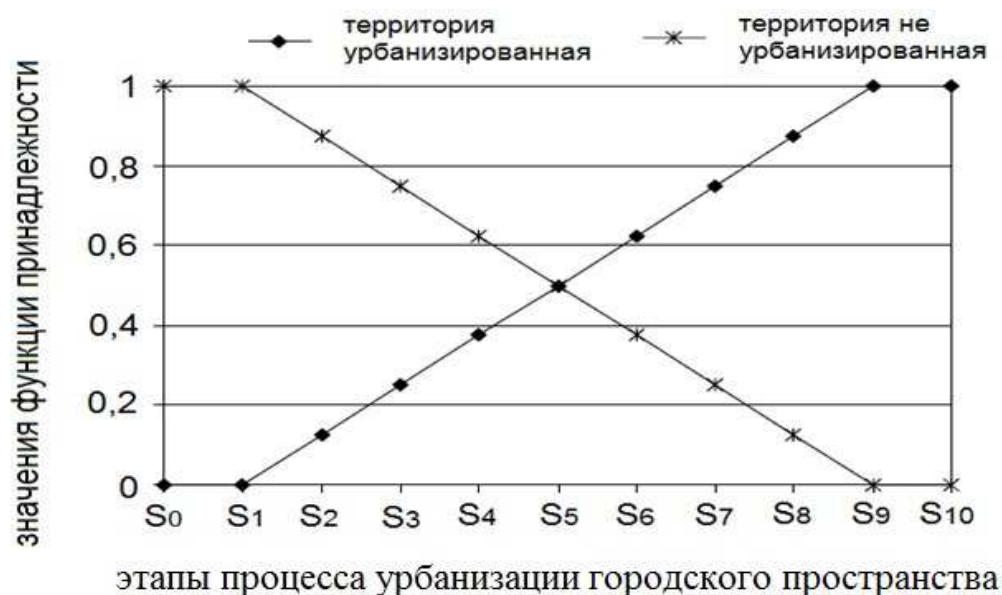


Рис. 4.3 – Линейные функции принадлежности, характеризующие различные процессы урбанизации городского пространства

На рис. 4.4 показаны три функции принадлежности, одна из которых имеет линейную зависимость, вторая – экспоненциальную зависимость и третья – имеет логарифмическую зависимость. Этапы развития градостроительной системы на рисунке представлены от этапа s_0 до этапа s_{10} . Каждая из функций принадлежности характеризует различные нечеткие множества, хотя и похожие по своему содержанию: множество единичных элементов *ОС*-пространства, принимающие участие в процессе развития градостроительной системы. Сам процесс развития градостроительной системы на рисунке происходит между этапами s_1 и s_9 . Степень и интенсивность процесса урбанизации полностью характеризуется видом функции принадлежности.

Прежде чем приступить к рассмотрению операций над нечеткими множествами следует привести некоторые важные соображения, которые необходимо принимать во внимание при определении нечетких аналогов обычных теоретико-множественных понятий.

Во-первых, следует иметь в виду, что то или иное нечеткое множество является обобщением классического множества. Поскольку в общем случае можно предложить самые различные варианты подобного обобщения, это приводит к принципиальной неоднозначности тех или иных определений, имеющих аналогию в классической теории множеств и представляющих практический интерес. Применительно к операциям над нечеткими множествами это означает, что любое определение той или

иной операции должно быть справедливым в том частном случае, когда вместо нечетких множеств используются обычные множества.

Другими словами, подобные определения должны превращаться в известные определения теоретико-множественных операций, если участвующие в них функции принадлежности заменить характеристическими функциями множеств.

Во-вторых, если при рассмотрении классических множеств понятие универсума можно мыслить в форме «все что угодно», то сравнение нечетких множеств и выполнение над ними различных операций становится возможным, только когда соответствующие нечеткие множества определены на одном и том же универсуме.

Наконец, в-третьих, поскольку каждое нечеткое множество вполне определяется своей функцией принадлежности, последнее понятие зачастую используется как синоним нечеткого множества. При этом следует помнить, что в общем случае одна и та же функция принадлежности может описывать качественно различные нечеткие множества. С другой стороны, хотя одно и то же нечеткое множество или точнее — то или иное свойство в форме нечеткого множества, может быть представлено различными функциями принадлежности, отражающими неоднозначность субъективных или иных представлений, с формальной точки зрения, все из них следует различать и говорить о различных нечетких множествах.

Поэтому, говоря о соответствии нечетких множеств и функций принадлежности, мы будем понимать это соответствие в форме математического изоморфизма.

Именно наличие подобного изоморфизма нечетких множеств, заданных одной и той же функцией принадлежности, позволяет рассматривать формальные определения на требуемом уровне строгости.

Применение операции объединения нечетких множеств S_{urban} и S_{non_urban} позволяет получить новое нечеткое множество, определяемое как $S_{urban_or_non_urban}$ в соответствии с выражением 4.1. Функция принадлежности $\mu_{urban_or_non_urban}$ нового множества принимает максимальные значения двух функций принадлежности соответствующих нечетких множеств S_{urban} и S_{non_urban} в соответствии с выражением 4.2.

$$S_{urban_or_non_urban} = S_{urban} \cup S_{non_urban} \quad (4.1)$$

Объединение

$$\mu_{S_{urban_or_non_urban}}(x_{i,j}) = \max(\mu_{S_{urban}}(x_{i,j}), \mu_{S_{non_urban}}(x_{i,j})) \quad (4.2)$$

Таким же образом, используя оператор AND, можно получить нечеткое множество $S_{intersection}$ в соответствии с выражением 4.3. Функция принадлежности $\mu_{intersection}$ нового множества принимает минимальные значения двух функций принадлежности соответствующих нечетких множеств S_{urban} и S_{non_urban} в соответствии с выражением 4.4.

$$S_{intersection} = S_{urban} \cap S_{non_urban} \quad (4.3)$$

Пересечение

$$\mu_{S_{intersection}}(x_{i,j}) = \min(\mu_{S_{urban}}(x_{i,j}), \mu_{S_{non_urban}}(x_{i,j})) \quad (4.4)$$

И наконец, используя унарный логический оператор NOT, можно получить дополнение к нечеткому множеству \bar{S}_{urban} в соответствии с выражением (4.5). Функция принадлежности $\mu_{complement}$ множества \bar{S}_{urban} определяется в соответствии с выражением 4.6.

$$S_{complement} = \bar{S}_{urban} \quad (4.5)$$

Дополнение

$$\mu_{S_{complement}}(x_{i,j}) = 1 - \mu_{S_{urban}}(x_{i,j}) \quad (4.6)$$

В рассматриваемом примере пересечение нечетких множеств S_{urban} и S_{non_urban} позволяет получить новое нечеткое множество, которое характеризует частичный уровень урбанизации исследуемой территории, так как она обладает свойствами как первого, так и второго нечеткого множества. В результате объединения двух нечетких множеств S_{urban} и S_{non_urban} получается нечеткое множество, характеризующее особенности как урбанизированной территории так и не урбанизированной, причем каждая единичная ячейка ОС-пространства получает тем большее значение функции принадлежности, чем большей степени территория соответствует урбанизированному или не урбанизированному состоянию и единичная ячейка ОС-пространства принимает тем меньшее значение, чем в большей

степени территория относится к частично урбанизированной территории. Выше изложенные рассуждения проиллюстрированы на рисунке 4.5

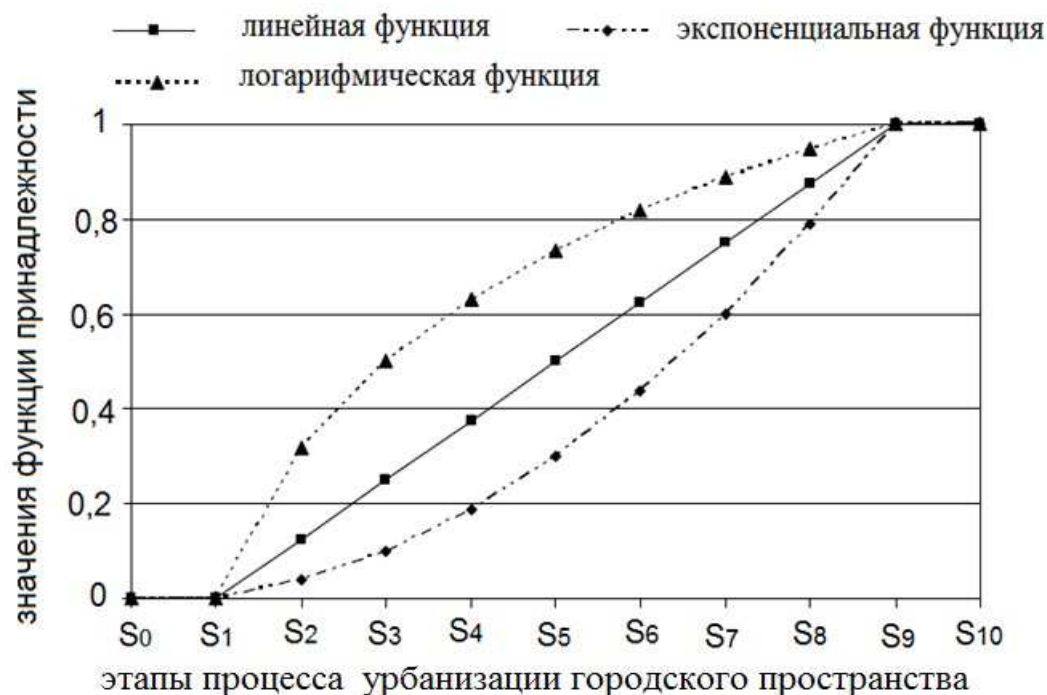


Рис. 4.4 – Различные виды функций принадлежности и их влияние на степень и интенсивность процесса урбанизации городского пространства



Рис. 4.5 – Функции принадлежности для операций пересечения и объединения двух множеств. (Процесс развития градостроительной системы представлен от этапа S₀ до этапа S₁₀)

4.1.3 Функционально-пространственное развитие градостроительной системы как нечеткий пространственно-временной процесс

В мировой теории и практике процесс урбанизации рассматривается как процесс распространения городского образа жизни; процесс концентрации, интеграции и интенсификации человеческой деятельности, глобальный и социально-экономический процесс. Основным критерием установления степени урбанизации территорий, регионов является превышение городского населения над сельским (свыше 50%).

При этом уровень урбанизации, находящийся в пределах 51-65%, считается среднеурбанизированным регионом, от 66% и выше – высокоурбанизированным.

Существует довольно значительное количество различных подходов к определению уровня и темпа урбанизации городской территории. Некоторые используют математические методы и модели, основанные на определении размера и плотности населения, которое располагается на исследуемой территории, другие основаны на использовании технологии дистанционного зондирования Земли, с помощью которой можно определить как размеры, так и назначение, и тип использования земельных ресурсов на рассматриваемой территории.

Так как городская система представляет собой скопление и высокую концентрацию зданий и сооружений на достаточно ограниченной территории то должны быть некоторые пороговые значения, которые позволят классифицировать переход населенного пункта из состояния, например, поселения городского типа к городу с высокой степенью урбанизации, хотя сами пороговые значения могут претерпевать изменения как в пространстве, так и во времени [51].

Различные критерии оценки размера и плотности населения используются для определения такого понятия как городская территория, причем для разных стран эти критерии разные. Например, в некоторых Скандинавских странах любое поселение, которое имеет более 200 жителей, классифицируется как город. В США в понятие города включены территории, на которых плотно проживает от 2 500 жителей и более, и некоторые специальные территориальные образования имеющие плотность 1 500 жителей на квадратную милю (около 580 жителей на квадратный километр). В Австралии территории с плотностью населения от 500 жителей на квадратную милю уже считается городским образованием. Многие страны сознательно значительно увеличили

пороговое значение для определения размера компактного проживания населения. Так, например, Греция установила 10 000 жителей, Япония – 30 000 жителей для населенных пунктов, которые могут считаться городом.

Разнообразие порогового значения в большей степени зависит от уровня экономического развития, состояния социальной инфраструктуры и отраслевой структуры экономики конкретной страны. Например, рассматривая физическую географию Скандинавии и направления, в которых ее поселения развиваются, то населенные пункты более 200 жителей могут вполне считаться городом. С другой стороны, в таком государстве как Япония с относительным дефицитом территории и высокой плотностью населения пороговое значение в 30 000 жителей может считаться реалистичным для того, чтобы такой населенный пункт отнести к городу. Плотность населения выступает как показатель освоенности территории, как показатель интенсивности хозяйственной деятельности людей и территориальной структуры хозяйства.

Для сравнения, в соответствии с ДБН 360-92 «Планування і забудова міських і сільських поселень» в Украине городские поселения в зависимости от количества населения делятся на следующие группы:

Группы поселений	Население в тыс.человек
Крупнейшие	Более 1000
Крупные	От 500 до 1000
Большие	От 250 до 500
Средние	От 100 до 250
Малые	От 20 до 50

В стороне от критерия плотности населения стоит подход, основанный на использовании технологии дистанционного зондирования Земли, так же применяемый для картографирования землепользования, почвенно-растительного покрова, плотности застройки, климатических условий и социально-экономических характеристик, которые изменяются в пространстве и времени в процессе развития городской среды.

Данные дистанционного зондирования, особенно те, которые получены со спутников с высокой степенью разрешения, таких как Landsat и SPOT, могут быть использованы для картографирования и исследования городских систем и их изменений во времени и пространстве, однако использование данных дистанционного

зондирования для получения атрибутивной, то есть описательной информации в настоящее время затруднено. Но наиболее важным и основным недостатком данных полученных методами дистанционного зондирования является невозможность различить и четко установить границы между урбанизированными и не урбанизированными районами картографируемой территории.

Так как городская система является физической концентрацией населения и сооружений то, следовательно, плотность населения и плотность жилой застройки являются теми критериями, которые могут быть применены для определения зон и областей интенсивной урбанизации территорий.

В частности, такие критерии позволяют успешно применить теорию нечетких множеств для разработки нечеткой концепции моделирования развития городских систем.

Рассмотрим нечеткое множество «городская территория», которое можно формально определить в виде уравнения:

$$S_{urban} = \{ (x_{i,j}, \mu_{S_{urban}}(x_{i,j})) \mid x_{i,j} \in X \}.$$

Значение функции принадлежности изменяется от 0 до 1, которая характеризует изменение состояния ячейки, находящейся в процессе территориального развития.

Например, если ячейка имеет значение функции принадлежности – 0, то такая ячейка находится в начале процесса урбанизации, если ячейка имеет значение функции принадлежности 1, то в этом случае она полностью соответствует требованиям, предъявляемым к урбанизированным территориям.

Ячейки, которые имеют значение функции принадлежности от 0 до 1 - имеют частичную степень урбанизации. Для определения математического выражения нечеткой функции принадлежности, которая будет определять степень разграничения городской территории, выберем в качестве критерия плотность населения. Плотность населения будет использована для измерения уровня городской урбанизации ячейки $x_{i,j}$ в нечетком множестве S_{urban} . Под обозначением S_{urban} будем понимать исследуемое градостроительное пространство.

Значение плотности населения зависит от многих других факторов, таких как плотность жилой застройки, от инженерной инфраструктуры, например, система водоотведения, система водоснабжения, система

газоснабжения и т.д., кроме того, от типа землепользования, информацию о котором можно получить на основании использования данных дистанционного зондирования Земли, кроме того, и от процента населения, занятого в агропромышленном секторе на исследуемой территории.

Например, если территория имеет низкую плотность населения, но высокую плотность застройки, или если на территории преобладают такие основные функциональные типы землепользования, как: селитебные; производственные; ландшафтно-рекреационные и другие, то плотность населения необходимо повысить к более высоким значениям. И наоборот, если исследуемая территория имеет относительно высокую плотность населения, однако значительная часть территории имеет сельскохозяйственное назначение, то значение плотности населения должно быть уменьшено для всей рассматриваемой территории.

Рассмотренный общий подход к определению городских территорий, разумеется, будет отличаться в разных странах. Если исследуемая территория имеет плотность населения меньше, чем определенное значение (пороговое значение), то эта территория будет считаться как не урбанизированная, и значение функции принадлежности для территории будет принимать значение 0; если исследуемая территория имеет плотность населения больше порогового значения, то территория имеет плотную застройку и функция принадлежности принимает значение 1. Пороговые значения плотности населения могут значительно изменяться от одной страны к другой или даже от одного города к другому. Поэтому, пороговые значения должны определяться индивидуально в соответствии с местоположением в различных странах или городах.

Например, таким низким порогом для Австралии является 200 человек на квадратный километр (соответственно 500 человек в квадратную милю), в то время как для Канады и Соединенных Штатов этот порог составляет 400 человек и 580 человек на квадратный километр, соответственно.

Предположим, $\rho_{x_{i,j}}$ – плотность населения, соответствующая ячейке x с i,j – координатами, рассматриваемого OC -пространства. Верхний и нижний порог плотности населения представлены значениями ρ_0 и ρ_1 , соответственно, с целью разграничения территориальных зон по показателю плотности населения. Для определения значения функции принадлежности для каждой ячейки рассматриваемого OC -пространства

используется линейная функция принадлежности, в соответствии с выражением 4.7:

$$\mu_{S_{urban}}(x_{i,j}) = \begin{cases} 0 & \rho_{x_{i,j}} < \rho_0 \\ \frac{\rho_{x_{i,j}} - \rho_0}{\rho_1 - \rho_0} & \rho_0 \leq \rho_{x_{i,j}} \leq \rho_1 \\ 1 & \rho_{x_{i,j}} \geq \rho_1 \end{cases} \quad (x_{i,j} \in X) \quad (4.7)$$

Используя данную функцию принадлежности, можно получить значение функции принадлежности, соответствующее заданному значению плотности населения.

Рассмотренный выше нечеткомножественный подход в определении урбанизированных территорий называется процессом фаззификации. Процесс фаззификации позволяет поставить в соответствие каждой ячейке *ОС*-пространства значение логико-лингвистических переменных, используя для этого рассмотренную выше функцию принадлежности (выражение 4.7).

Например, если плотность населения для единичного клеточного автомата (ячейки) *ОС*-пространства - меньше, чем нижний порог ρ_0 , то клеточный автомат принимает значение 0. В этом случае состояние единичного клеточного автомата будет расцениваться как «не урбанизированная».

Если плотность населения для единичного клеточного автомата (ячейки) *ОС*-пространства выше, чем верхний порог ρ_1 , то в этом случае состояние единичного клеточного автомата будет расцениваться как «урбанизированная», а соответствующие клеточные автоматы принимают значение 1.

Все другие единичные клеточные автоматы получают значение функции принадлежности в интервале $[0;1]$, тем самым представляя степень урбанизации исследуемой территории. Состояния таких единичных клеточных автоматов можно отнести к «частично урбанизированному».

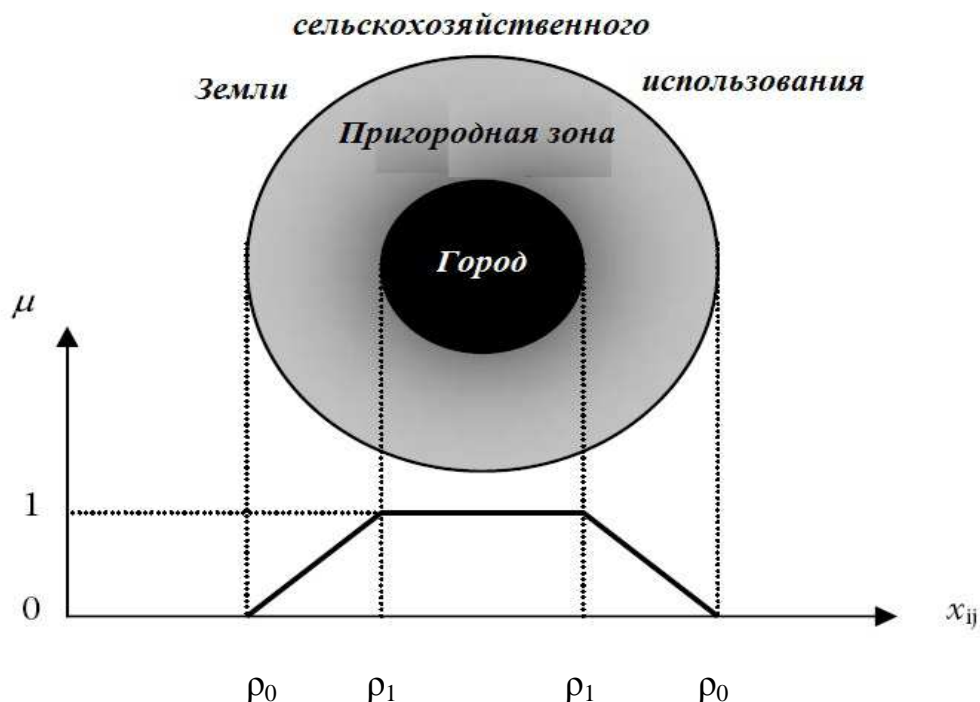


Рис. 4.6 – Иллюстрация нечеткомножественного подхода в определении урбанизированных территорий. Значение функции принадлежности μ определяет степень принадлежности каждой ячейки $x_{i,j}$ урбанизированной территории; ρ_1 и ρ_0 , соответственно, верхний и нижний пороги плотности населения, что и определяет разграничение территории

Такой подход позволяет моделировать непрерывный процесс перехода территории из состояния «не урбанизированная» к состоянию «урбанизированная», то есть моделировать процесс пространственного развития градостроительной системы.

4.2 Нечеткая логика в моделях функционально-пространственного развития градостроительных систем, основанное на однородных структурах

Для моделирования развития пространственной организации городской системы, которая тесным образом связана с социальной организацией общества, природно-географическими условиями, техническими возможностями, финансовыми ресурсами и целым рядом других факторов, и в известной степени зависима от них, целесообразно использовать формализмы теории нечетких множеств, которые позволяют моделировать плавное изменение свойств исследуемого объекта, а также неизвестные функциональные зависимости, выраженные в виде качественных связей.

В этом разделе представлена методология нечеткого управления, которая применяется при моделировании развития пространственной организации городской системы.

Так же как и нечеткое управление, основанное на двух важнейших понятиях – лингвистической переменной и нечеткой логике – эти два понятия рассматриваются первыми, а затем обсуждаются вопросы, связанные с применением нечеткого управления при моделировании развития пространственной организации городской системы, особенно в моделях, основанных на ОС-структурах.

4.2.1 Общие понятия о лингвистической переменной и нечеткой логике

«Под лингвистической переменной понимается такая переменная, значениями которой являются слова и словосочетания на некотором естественном или искусственном языке. С учетом нашего преклонения перед всем точным, строгим и количественным и нашего пренебрежения ко всему нечеткому, нестрогому и качественному неудивительным кажется приход цифровых компьютеров... эти компьютеры оказались весьма эффективными при работе с механистическими, т.е. неживыми системами, поведение которых определяется законами механики, физики, химии, электромагнетизма. К сожалению, этого нельзя сказать о гуманистических системах...» [51].

Далее профессор Л. Заде указывает, что «неэффективность компьютеров в работе с гуманистическими системами является выражением принципа несовместимости, согласно которому высокая точность несовместима с большой сложностью».

Поскольку слова в общем менее точны, чем числа, понятие лингвистической переменной дает возможность приближенно описывать явления, которые настолько сложны, что не поддаются описанию в общепринятых количественных терминах. В частности, нечеткое множество, представляющее собой ограничение, связанное со значениями лингвистической переменной, можно рассматривать как совокупную характеристику различных подклассов элементов универсального множества. В этом смысле роль нечетких множеств аналогична той роли, которую играют слова и предложения в естественном языке. Например, прилагательное *красивый* отражает комплекс характеристик внешности индивидуума. Это прилагательное можно также рассматривать как название нечеткого множества, представляющего собой ограничение,

обусловленное нечеткой переменной *красивый*. С этой точки зрения, термины *очень красивый*, *некрасивый*, *чрезвычайно красивый*, *вполне красивый* и т. д. - названия нечетких множеств, образованных путем действия модификаторов *очень*, *не*, *чрезвычайно*, *вполне* и т. п. на нечеткое множество *красивый*. В сущности, эти нечеткие множества вместе с нечетким множеством *красивый* играют роль значений лингвистической переменной *внешность*.

Важным аспектом понятия лингвистической переменной является то, что эта переменная более высокого порядка, чем нечеткая переменная, в том смысле, что значениями лингвистической переменной являются нечеткие переменные. Например, значениями лингвистической переменной «Возраст» могут быть слова: *молодой*, *немолодой*, *старый*, *очень старый*, *немолодой и не старый*, *вполне старый* и т. п. Иллюстрация рассматриваемой лингвистической переменной показана на рис. 4.7[51].

Каждое из перечисленных значений является названием нечеткой переменной. Если X – название нечеткой переменной, то ограничение, обусловленное этим названием, можно интерпретировать как смысл нечеткой переменной X . Так, нечеткая переменная *старый*, представляет собой нечеткое подмножество множества $U = [1, 100]$ вида:

$$\bar{M}(\text{старый}) = \{(u, \mu_{\text{старый}}(u)) \mid u \in [0, 100]\}, \quad (4.8)$$

где $\mu_{\text{старый}}$ – функция принадлежности значения u лингвистической переменной *старый*, которая может быть представлена в виде следующего выражения:

$$\mu(u) = \begin{cases} 0 & u \in [0, 50] \\ \left(1 + \left(\frac{u-50}{5}\right)^{-2}\right)^{-1} & u \in [50, 100] \end{cases} \quad (4.9)$$

Лингвистическая переменная характеризуется набором:

$$\text{ЛП} = (\Omega, T(\Omega), U, G, M),$$

где Ω – название переменной;

$T(\Omega)$ – обозначает терм-множество переменной Ω , т.е. множество названий лингвистических значений переменной Ω , причем каждое из таких значений является нечеткой переменной X со значениями из универсального множества U с базовой переменной u ;

U – универсальное множество U с базовой переменной u ;

G – синтаксическое правило (имеет обычно форму грамматики), порождающее названия X значений переменной Ω ;

M – семантическое правило, которое ставит в соответствие с каждой нечеткой переменной X ее смысл $M(X)$, т. е. нечеткое подмножество $M(X)$ универсального множества U .

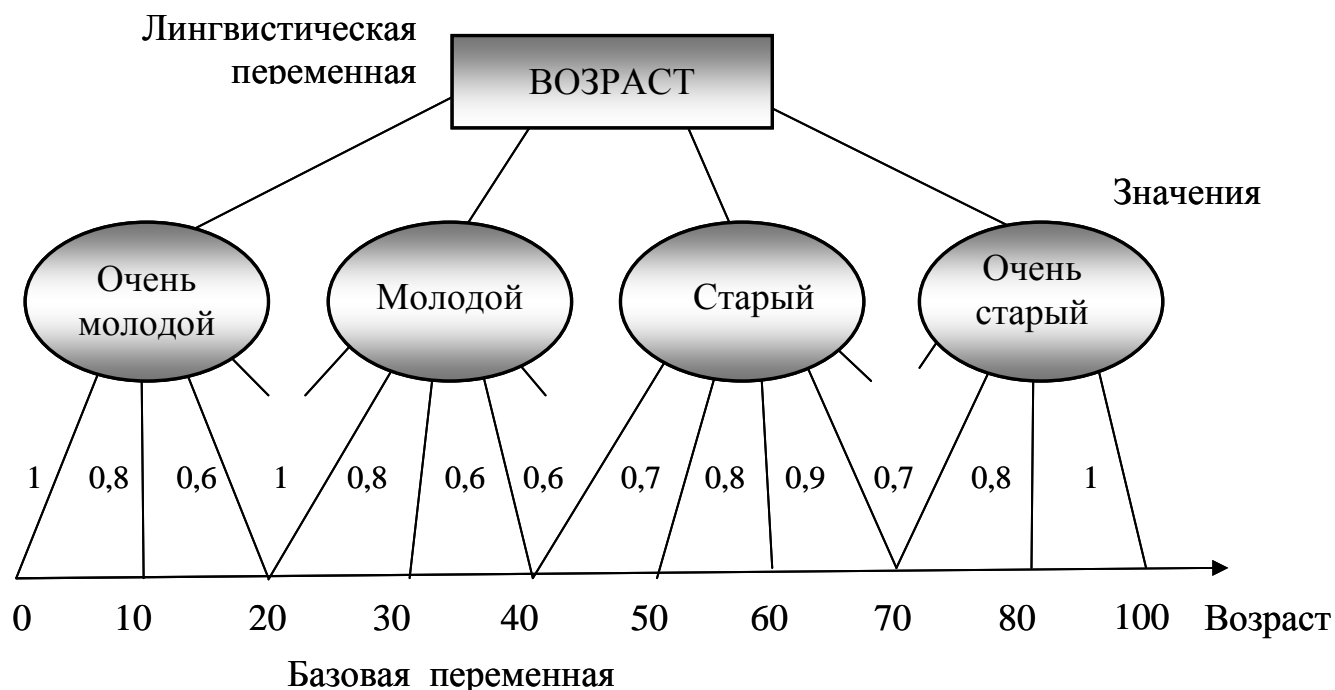


Рис. 4.7 – Иерархическая декомпозиция лингвистической переменной «Возраст»

Конкретное название X , порожденное синтаксическим правилом G , называется термом.

Терм, состоящий из одного слова или нескольких слов, всегда фигурирующих вместе друг с другом, называется атомарным термом. Терм, состоящий из одного или более атомарных термов, называется составным термом. Конкатенация некоторых компонент составного терма является подтермом. Если X_1, X_2, \dots - термы в T , то T можно представить в виде объединения:

$$T = X_1 + X_2 + \dots$$

Если необходимо указать на то, что T был порожден грамматикой G , обозначается как $T(G)$.

Кроме первичных термов лингвистическое значение может включать в себя связки, такие, как *и*, *или*, ..., *ни* и т.п.; отрицание *не*, такие неопределенности, как *очень*, *более* или *менее*, *должным образом*,

чрезвычайно, которые могут оказывать существенное влияние на содержание лингвистических термов. То есть, связки, отрицания, неопределенности можно трактовать как операторы, которые видоизменяют смысл первичных термов особым, независимым от контекста образом. Например, если функция принадлежности лингвистического значения *старый* изображается кривой, показанной на рис. 4.8, то смысл лингвистического значения *очень старый* может быть получен возведением в квадрат значений функции принадлежности лингвистического значения *старый*. Смысл лингвистического значения *не старый* можно получить, вычитая из 1 значения этой функции принадлежности (рис. 4.8.).

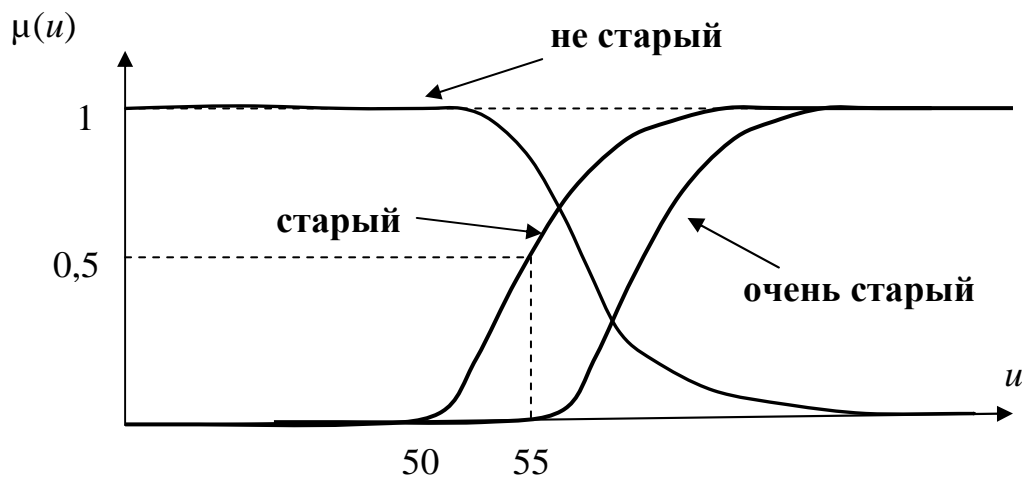


Рис. 4.8 – Функции принадлежности для лингвистических значений *не старый*, *старый* и *очень старый*

Алгебраические операции над нечеткими множествами играют важную роль в семантике лингвистических переменных. Обозначив M как нечеткое множество, запишем несколько полезных операций:

1. Концентрация нечеткого множества $M \subseteq X$ обозначается $\mathbf{CON}(M)$ и определяется как:

$$\mu_{\mathbf{CON}(M)}(x) = (\mu_M(x))^2 \quad \text{для каждого } x.$$

Эта операция при действиях с лингвистической переменной обычно отождествляется с модификатором «очень».

2. Растяжение нечеткого множества $M \subseteq X$ обозначается $\mathbf{DIL}(M)$ и определяется как:

$$\mu_{\mathbf{DIL}(M)}(x) = (\mu_M(x))^{0,5} \quad \text{для каждого } x.$$

Данная операция обычно отождествляется с модификаторами «примерно», «приблизительно».

Графическая интерпретация операции концентрации и растяжения

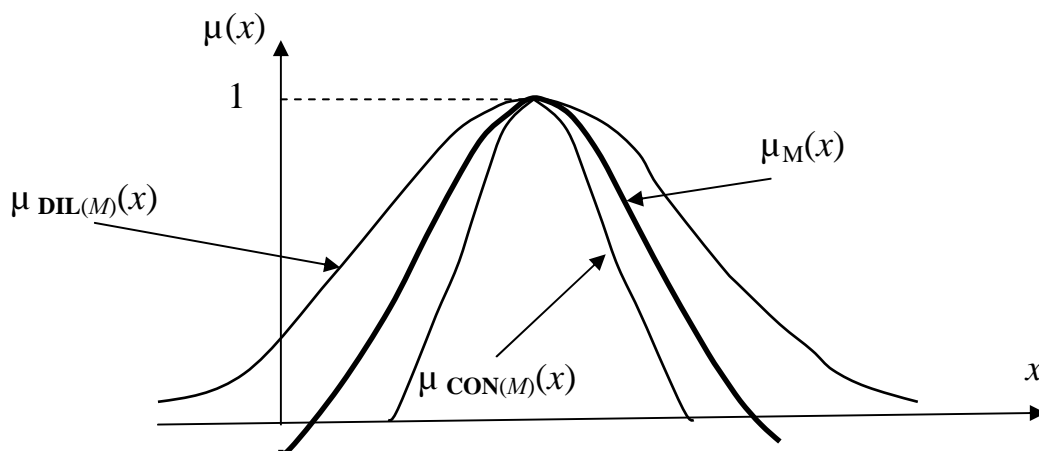


Рис. 4.9 – Графическое представление операций концентрации и растяжения нечеткого множества

представлена на рис. 4.9.

Логика высказываний представляет собой начальный раздел математической логики и занимается исследованием операций с высказываниями. Одна из задач логики высказываний – построение формальных правил вывода правдоподобных суждений на основе заданной совокупности исходных фактов и известных отношений между ними.

Под высказыванием понимается повествовательное предложение, содержащее некоторое утверждение и обладающее тем свойством, что оно может быть либо истинным (*TRUE*) либо ложным (*FALSE*), но не тем и другим одновременно. В литературе по математической логике можно встретить следующие обозначения булевой переменной «1», «0», «И», «Л», «Т», «F». Символы A, B, C, \dots , используемые для именования элементарных высказываний, называются атомарными формулами или атомами. Составные высказывания строятся из элементарных (атомов) с помощью логических связок. В логике высказываний используют пять логических связок:

\sim (не), \wedge (и), \vee (или), \rightarrow (если ... то), \longleftrightarrow (тогда и только тогда).

Из знаков атомов, соответствующих простым высказываниям, и знаков логических связок в логике высказываний формируются выражения, позволяющие формально описывать структуры составных высказываний. Фундаментальным понятием в логике высказываний является понятие «формулы».

Правильно построенные формулы (или короче – формулы) определяются рекурсивно следующими правилами:

1. Атом есть формула;
2. Если A – формула, то $(\sim A)$ – формула;
3. Если A и B – формулы, то $(A \wedge B)$, $(A \vee B)$, $(A \rightarrow B)$, $(A \leftrightarrow B)$ формулы;
4. Никаких формул, кроме порожденных применением правил 1–3 нет.

Для обеспечения однозначности смысла формул используются круглые скобки. Знакам логических операций приписывается убывающий ранг в следующем порядке: \leftrightarrow , \rightarrow , \wedge , \vee , \sim .

Ранг связки имеет тот смысл, что логическая связка с большим рангом имеет большую область действия.

Пусть A и B – формулы. Тогда истинностное значение формул $\sim A$, $A \wedge B$, $A \vee B$, $A \rightarrow B$, $A \leftrightarrow B$ связано с истинностными значениями формул A , B следующим образом:

1. Формула $\sim A$ истинна, когда формула A ложна и ложна, когда A истинна. Формула $\sim A$ называется *отрицанием* формулы A .

2. Формула $A \vee B$ истинна, если, по крайней мере, одна из формул A – B истинны, в противном случае формула $A \vee B$ ложна. Формула $A \vee B$ называется *дизъюнкцией* формул A – B .

3. Формула $A \wedge B$ истинна, если формула A и B обе истинны, в противном случае формула $A \wedge B$ ложна. Формула $A \wedge B$ называется *конъюнкцией* формул $A \wedge B$.

4. Формула $A \rightarrow B$ ложна, если A истинна и B ложна, во всех остальных случаях $A \rightarrow B$ истинна. Формула $A \rightarrow B$ называется *импликацией* A и B .

5. Формула $A \leftrightarrow B$ истинна тогда и только тогда, когда $A \wedge B$ имеют одинаковые истинностные значения, в противном случае правильно посужа формула $A \leftrightarrow B$ истинна, по крайней мере, одна из формул A – B истинны, в противном случае формула $A \leftrightarrow B$ ложна. Формула $A \leftrightarrow B$ называется *эквивалентией* A и B .

Отношения между булевыми переменными, которые рассматриваются как логические операции, представляются булевыми функциями. В зависимости от числа переменных количество булевых функций возрастает по закону $f(n) = 2^{2^n}$.

Например, для двух аргументов существует 16 булевых функций, для трех аргументов – 256, для 4 аргументов – 65536 функций. В литературе

нашли широкое применение булевы функции двух переменных. Соотношения между значениями истинности для двух высказываний A и B и получаемых из них с помощью логических связок приведено в таблице 4.1. Атомарные высказывания A и B могут принимать значение $TRUE$, в таблице представлено как «1», и $FALSE$ – соответственно в таблице показано как «0». Различные логические операции, выполняемые над высказываниями A и B в таблице обозначены как $w_1 - w_{16}$.

Таблица 4.1

A	B	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6	w_7	...	w_{16}
1	1	0	1	0	1	1	1	1	...	0
1	0	0	1	1	0	0	1	1	...	1
0	1	0	1	1	1	0	0	1	...	0
0	0	1	0	0	1	1	0	1	...	0

Интерпретация формул логики высказываний не вызывает трудностей для первых пяти колонок таблицы 4.1. Первые пять логических операций по своему применению максимально приближены к грамматическим конструкциям. Например, первая колонка (w_1) содержит результаты выполнения операции логическое «и», вторая колонка (w_2) содержит результаты операции логическое «или», в третьей колонке (w_3) – результаты операции «исключающее или», которое приближается к конструкции «либо ... либо ...», четвертая колонка (w_4) и пятая (w_5) – представляют соответственно результаты логических операций «импликация», что по своему применению приближенная к союзу «если... то...» и логическая операция «эквиваленция», которая по своему применению приближается к союзу «если, и только если ...». Необходимо отметить, что интерпретация формул логики высказываний к последним девяти логическим операциям (w_6 к w_{16}) будет достаточно трудно в терминах естественного языка. Более того, если необходимо выполнить интерпретацию для трех формул логики высказываний, то построение таблицы истинности становится еще более затруднительным [80].

Еще одним важным вопросом математической логики является возможность делать логические выводы. То есть получать логическое следствие из формул логики высказываний. Под логическим следствием будем понимать суждение, получающееся в результате сопоставления исходных суждений и применения к ним законом мышления. Важно

отметить, что результирующее суждение несет в себе новое знание о свойствах некоторого процесса, явления, феномена или об отношениях между ними. Исходные суждения называются посылками. Формальное определение логического следствия сводится к следующему.

Пусть даны формулы F_1, F_2, \dots, F_n и формула G . Говорят, что G есть *логическое следствие* формул F_1, F_2, \dots, F_n тогда и только тогда, когда для всякой интерпретации I , в которой формула $(F_1 \wedge F_2 \wedge \dots \wedge F_n)$ истинна, формула G тоже истинна. Формулы F_1, F_2, \dots, F_n называются *аксиомами* (постулатами, посылками) следствия G .

Тот факт, что формула G является логическим следствием F_1, F_2, \dots, F_n формально записывается в виде:

$$F_1, \dots, F_n \models G,$$

обозначающее тот факт, что формулы F_1, \dots, F_n логически влекут формулу G .

Тот факт, что G есть логическое следствие F_1, \dots, F_n может быть установлено непосредственно по таблицам истинности F_1, \dots, F_n и G .

Однако существует другой путь установления факта логического следствия, сводящийся к проверке общезначимости некоторой производной формулы. В основе этого способа лежат две важные теоремы.

Теорема 1. Пусть даны формулы F_1, \dots, F_n и формула G . Чтобы G была логическим следствием F_1, \dots, F_n , необходимо и достаточно, чтобы формула $(F_1 \wedge F_2 \wedge \dots \wedge F_n) \rightarrow G$ была общезначима.

Доказательство необходимости сводится к следующему. Пусть действительно будет $F_1, \dots, F_n \models G$, а I - некоторая интерпретация для F_1, \dots, F_n, G . Если F_1, \dots, F_n истинны в I , то по определению логического следствия и G истинно в I . Следовательно, $(F_1 \wedge F_2 \wedge \dots \wedge F_n) \rightarrow G$ истинна в I . Если же не все из F_1, \dots, F_n истинны в I , все равно $(F_1 \wedge F_2 \wedge \dots \wedge F_n) \rightarrow G$ истинна. Таким образом, если $F_1, \dots, F_n \models G$, то $(F_1 \wedge F_2 \wedge \dots \wedge F_n) \rightarrow G$ истинна при любой интерпретации.

Для доказательства достаточности положим, что $(F_1 \wedge F_2 \wedge \dots \wedge F_n) \rightarrow G$ общезначима формула. Для всякой интерпретации I , если $(F_1 \wedge F_2 \wedge \dots \wedge F_n)$ истинна в I , то и G должна быть истинна в I . Следовательно, $F_1, \dots, F_n \models G$, что и требовалось доказать.

Теорема 2. Формула G есть логическое следствие формул F_1, \dots, F_n тогда и только тогда, когда $F_1 \wedge F_2 \wedge \dots \wedge F_n \wedge \neg G$ противоречива.

Доказательство сводится к следующему. По теореме 1 $F_1, \dots, F_n \models G$ всегда, когда формула $(F_1 \wedge F_2 \wedge \dots \wedge F_n) \rightarrow G$ общезначима. Следовательно, $F_1, \dots, F_n \models G$ тогда, когда отрицание $(F_1 \wedge F_2 \wedge \dots \wedge F_n) \rightarrow G$ противоречиво. Преобразуя это отрицание к конъюнктивной нормальной форме, получаем:

$$\neg((F_1 \wedge \dots \wedge F_n) \rightarrow G) = \neg(\neg(F_1 \wedge \dots \wedge F_n) \vee G) = \neg(\neg(F_1 \wedge \dots \wedge F_n)) \wedge \neg G = (F_1 \wedge \dots \wedge F_n) \wedge \neg G = F_1 \wedge \dots \wedge F_n \wedge \neg G. \text{ Теорема доказана.}$$

Из теорем 1, 2 вытекает доказательство того, что отдельная формула есть логическое следствие конечного множества формул, эквивалентно доказательству того, что некоторая связанная с ним формула общезначима или непротиворечива.

Необходимо отметить некоторые определения. Если $F_1, \dots, F_n \models G$, то формула $(F_1 \wedge F_2 \wedge \dots \wedge F_n) \rightarrow G$ называется *теоремой*, а G - *заключением* теоремы. Использование теорем 1, 2 для доказательства факта $F_1, \dots, F_n \models G$ сводится в первом случае к доказательству общезначимости формулы $(F_1 \wedge F_2 \wedge \dots \wedge F_n) \rightarrow G$ путем сведения ее к конъюнктивной нормальной форме, а во втором случае – к доказательству противоречивости формулы $(F_1 \wedge F_2 \wedge \dots \wedge F_n \wedge \neg G)$ путем сведения ее к дизъюнктивной нормальной форме.

Тождественно истинная формула, то есть такая формула, которая принимает значения 1 (TRUE) при любых интерпретациях значений ее атомов, называется *тавтологией*. Тождественно ложная формула при всех интерпретациях ее атомов принимает значение 0 (FALSE) и называется *противоречием*. Примером тавтологии может служить высказывание: «Если внедрить новую технологию (P), то качество принятия решений улучшится (Q). При улучшении качества принятия решений (Q), повышается качество жизни населения (R). Новая технология внедрена (P). Следовательно, качество жизни улучшилось (R)». Формально данное высказывание можно записать в виде формулы

$$(P \rightarrow Q) (Q \rightarrow R) P \rightarrow R.$$

Чтобы выяснить, является ли данная формула тавтологией, можно составить для нее истинностную таблицу. Так, для приведенной выше формулы имеем:

P	Q	R	$P \rightarrow Q$	$Q \rightarrow R$	$(P \rightarrow Q)(Q \rightarrow R)P$	$(P \rightarrow Q)(Q \rightarrow R)P \rightarrow R$
0	0	0	1	1	0	1
0	0	1	1	1	0	1
0	1	0	1	0	0	1
0	1	1	1	1	0	1
1	0	0	0	1	0	1
1	0	1	0	1	0	1
1	1	0	1	0	0	1
1	1	1	1	1	1	1

Очевидно формула не является тавтологией, если она принимает значение 0 (*FALSE*) хотя бы на одном наборе интерпретации. Таким обстоятельством можно воспользоваться для распознавания тавтологией сокращенным методом «обратного рассуждения», которое заключается в поиске таких переменных, при которых формула оказывается ложной. Так, приведенная выше формула может принять значение 0 (*FALSE*), если и только если R ложно, а $(P \rightarrow Q)(Q \rightarrow R)P$ истинно. При этом должны быть истинны $P \rightarrow Q$, $Q \rightarrow R$ и P . При истинном P формула $P \rightarrow Q$ истинна только при истинном Q . В свою очередь, при истинном Q формула $Q \rightarrow R$ истинна только при истинном R . Таким образом, анализируемая формула может быть ложной, если и только если R одновременно и истинно и ложно, что невозможно в силу закона противоречия. Следовательно, она является тавтологией.

Различные подстановки в тавтологию, независимо от их конкретного содержания, всегда являются истинными предложениями в силу одной только своей логической структуры. Тавтологии можно рассматривать как некоторые *логические истинные схемы* рассуждений или утверждений. Поэтому они играют роль законов (теорем) логики высказываний, претендующих на установление методов построения правильных умозаключений.

Существует бесконечное множество тавтологий, а значит, и законов логики высказываний.

Наиболее часто используемые тавтологии следующие:

$P \rightarrow P$ (закон тождества);
 $P \wedge \neg P$ (закон исключения третьего);

$$\overline{P}P$$

(закон противоречия);

$$\overline{\overline{P}} \sim P$$

(закон двойного отрицания);

$$P \rightarrow (Q \rightarrow P)$$

(добавление антецедента или *verum ex* –

истина из чего угодно);

$$\overline{P} \rightarrow (P \rightarrow Q)$$

(*ex falso quodlibet* – из ложного что угодно) ;

$$(P \rightarrow Q) P \rightarrow Q$$

(закон *отделения* или ***modus ponens***) ;

$$(P \rightarrow Q) \overline{Q} \rightarrow P$$

(закон ***modus tollens***) ;

$$(P \rightarrow Q) \rightarrow (Q \rightarrow R) \rightarrow (P \rightarrow R)$$

(закон *силлогизма*) ;

$$(P \rightarrow Q) \rightarrow (\overline{Q} \rightarrow \overline{P})$$

(закон *контрапозиции*).

Каждый из законов логики высказываний отображает в символической форме некоторую схему доказательства. Например, в соответствии с законом *modus ponens*, если истинно, что некоторое высказывание P имплицирует высказывание Q и, кроме того, P истинно, то истинно и Q .

Modus tollens применяется при доказательстве от противного: желая доказать утверждение P , предполагается, что P ложно, и показывается, что P имплицирует некоторое высказывание Q , о котором известно, что оно ложно (\overline{Q} истинно). Отсюда заключается, что P истинно.

Формализация процесса вывода имеет большое теоретическое значение и позволяет построить схему доказательства, которая может быть реализована на основании использования современных вычислительных технологий.

Данный раздел написан в соответствии с работой [53]. Детальное изложение применений нечеткой логики в конкретных практических задачах можно найти в [50, 60 и др.].

Нечеткая логика (*fuzzy logic*) является обобщением классической формальной логики. Данное понятие было впервые предложено американским ученым Лотфи Заде (*Lotfi Zadeh*) в 1965 г. Основной причиной расширения классической логики будет наличие приближенных рассуждений при описании человеком процессов, явлений, событий, систем и объектов.

Широкое применение нечеткой логики произошло после доказательства в конце 80-х Бартоломеем Коско знаменитой теоремы *FAT* (*Fuzzy Approximation Theorem*). В бизнесе и финансах нечеткая логика получила признание после того как в 1988 году экспертная система на основе нечетких правил для прогнозирования финансовых индикаторов

единственная предсказала биржевой крах. В настоящее время количество успешных фаззи-применений исчисляется тысячами.

Нечеткая логика позволяет моделировать сложные системы, используя более высокий уровень абстракции, основываясь на человеческом знании и опыте. Это знание и опыт могут быть выражены через субъективные лингвистические переменные, такие как *высокий*, *горячий* или *холодный* и *теплый*. Такие лингвистические переменные могут быть отображены в точные числовые диапазоны.

Нечетким логическим выражением называется формула, в состав которой входят нечеткие предикаты. Нечетким предикатом называется отображение

$$P^{fuzzy} : X^n \rightarrow [0, 1],$$

где $X = \{x\}$, n – любое натуральное число, принадлежащее отрезку $[0, 1]$.

Число, которое предикат ставит в соответствие с конкретным набором $(x_{k_1}, x_{k_2}, \dots, x_{k_n})$, где $k_i \in \overline{1, n}$, называется *степенью принадлежности* описываемого данным набором высказывания к множеству истинных высказываний или коротко – *степенью истинности*. Интерпретация степени истинности, как и для функции принадлежности, может быть следующей: степень истинности – это вероятность того, что лицо, принимающее решение (ЛПР) назовет высказывание истинным.

Нечеткие логические выражения (или нечеткие формулы) отличаются от обычных наличием в их формулировках лингвистических и нечетких переменных, а также и нечетких отношений (предикатов). Рассмотрим некоторые примеры.

1. Нечеткий предикат примерного равенства $AE(x, y): x \approx y$, где $x, y \in R$.
2. Нечеткий предикат порядка $GT(C, H): C H$, где C, H – нечеткие числа.

Пусть μ_1 и μ_2 – степени истинности высказываний \mathfrak{B}_1^{fuzzy} и \mathfrak{B}_2^{fuzzy} , (в которые превращаются нечеткие предикаты \mathfrak{B}_1^{fuzzy} и \mathfrak{B}_2^{fuzzy} после подстановки вместо переменных $(x_{k_1}, x_{k_2}, \dots, x_{k_n})$ элементов множества X).

Тогда степень истинности сложного высказывания, образованного из \mathfrak{B}_1^{fuzzy} и \mathfrak{B}_2^{fuzzy} с помощью операций дизъюнкции, конъюнкции и отрицания, может быть определена следующим образом:

$$\mu(\mathfrak{B}_1^{fuzzy} \vee \mathfrak{B}_2^{fuzzy}) = \oplus(\mu_1, \mu_2); \quad (4.10)$$

$$\mu(\mathfrak{B}_1^{fuzzy} \wedge \mathfrak{B}_2^{fuzzy}) = \otimes(\mu_1, \mu_2); \quad (4.11)$$

Здесь операции \oplus и \otimes соответствуют операциям объединения и пересечения нечетких множеств. При минимаксной интерпретации функции принадлежности будут иметь вид:

$$\oplus(\mu_1, \mu_2) = \max \{ \mu_1, \mu_2 \}; \quad (4.12)$$

$$\otimes(\mu_1, \mu_2) = \min \{ \mu_1, \mu_2 \}; \quad (4.13)$$

Нечеткой называется логика, в которой степень истинности высказываний определяется выражениями (4.10) – (4.13).

Степень истинности более сложных высказываний можно определить, последовательно сворачивая их с учетом старшинства операций и применяя формулы (4.10) – (4.13). Задание нечетких предикатов может производиться путем специального опроса ЛПР или с использованием нечетких алгоритмов.

Рассмотрим условный нечеткий оператор общего вида

$$\text{если } \Omega, \text{ то } \Theta \text{ иначе } \Psi, \quad (4.14)$$

где Ω – некоторое нечеткое логическое выражение (условие);

Θ, Ψ – группы нечетких операторов (в частности, в эти группы могут входить и обычные четкие операторы). Результат выполнения условного оператора (4.14) определим выражением:

$$\Omega(\text{если } \Omega, \text{ то } \Theta, \text{ иначе } \Psi) = \{ \mu_{\Omega} / V(\Theta), (1 - \mu_{\Omega}) / V(\Psi) \}, \quad (4.15)$$

где $\Omega(\zeta)$ – результат выполнения оператора ζ ,

μ_{Ω} – степень истинности условия Ω .

Таким образом, результатом выполнения условного нечеткого оператора является нечеткое множество результатов выполнения соответствующих групп нечетких операторов. Содержательно определение (4.15) означает, что начинают выполняться обе группы нечетких операторов Θ и Ψ , однако каждая группа помечается своей пометкой – степенью истинности.

При необходимости однозначного определения группы операторов можно воспользоваться двумя способами.

1. Задать порог истинности $\gamma_0 \in (0, 1)$. Вычислить μ_{Ω} . Тогда можно записать:

$$\Omega(\text{если } \Omega \text{ то } \Theta \text{ иначе } \Psi) = \begin{cases} V(\Theta), & \mu_{\Omega} \geq \gamma_0 \\ V(\Psi), & \mu_{\Omega} < \gamma_0 \end{cases} \quad (4.16)$$

Необходимо обратить внимание на значение $\gamma_0 = 0,5$. Оно относится к случаю, когда переход к выполнению группы нечетких операторов Θ осуществляется, если условие Ω более истинно, чем ложно. Увеличение γ_0

свыше 0,5 означает повышение требований к уровню определенности заключения об истинности Ω .

2. Вычислить μ_{Ω} . Разыграть равномерную распределенную на интервале $[0,1]$ случайную величину. Пусть полученное значение есть γ_0 . Тогда искомый результат определяется выражением (4.16). Здесь μ_{Ω} рассматривается как вероятность истинности условия Ω .

В общем случае степень истинности оказывается не числом из отрезка $[0,1]$, а нечетким числом. Логика, в которой степени истинности являются нечеткими числами, называется *лингвистической*. Иногда в литературе нечеткую логику называют многозначной, лингвистическую логику – нечеткой.

Лингвистическая степень истинности (ее значения – нечеткие числа) появляется, в частности, при оценке истинности одних нечетких высказываний относительно других. Пусть имеются высказывания

$$W : (X \text{ есть } F) \quad \text{и} \quad Q : (X \text{ есть } G),$$

где F, G – нечеткие подмножества U . Тогда истинность Q относительно W вычисляется как степень соответствия G и F [60]:

$$T(W, Q) = \bigcup_{\tau \in [0,1]} \mu_T(\tau),$$

$$\text{где} \quad \mu_T(\tau) = \sup \mu_F(u),$$

$$u: \mu = \mu_G(u)$$

Одним из элементов лингвистической логики является правило истинности модификации, которое заключается в следующем. Пусть известно, что лингвистическая степень истинности высказывания $Q : (X \text{ есть } G)$ равна T . Тогда справедливо высказывание $W : (X \text{ есть } F)$,

$$F = \bigcup_{u \in U} \mu_F(\tau),$$

$$\text{где} \quad \mu_F(u) = \mu_T(\mu_G(u)),$$

$$u = \mu_G^{-1}(\tau),$$

В лингвистической логике вводятся операции над лингвистическими истинностями, определяемые на основе формул (4.12) – (4.15) по принципу обобщения. Операции позволяют вычислять лингвистическую степень истинности составных логических выражений.

Отдельное направление работ в лингвистической логике связано с изучением построения выводов из нечетких посылок, включающих нечеткие кванторы типа «редко», «очень часто» и т.п.

Рассмотрим правило логического вывода *modus ponens* в условиях нечеткой интерпретации. Допустим A , A^* , B , B^* представляют собой четыре нечетких высказывания (в литературе часто используется термин – утверждения); тогда обобщенное правило *modus ponens* будет читаться следующим образом: например, если x представляет собой лингвистическую переменную *плотность населения*, то y – лингвистическую переменную *потенциал развития*, A и A^* представляют нечеткое высказывание «высокая плотность населения» и «очень высокая плотность населения»; B и B^* соответственно, нечеткие высказывания – «высокий потенциал для развития» и «очень высокий потенциал для развития», то можно сформулировать следующий логический вывод:

Условие. Территория x имеет очень высокую плотность населения (A^*).

Импликация. Если территория x имеет высокую плотность населения (A), то данная территория y имеет высокий потенциал для развития (B).

Вывод. Территория имеет x очень высокий потенциал для развития (B^*).

Рассмотренное правило можно записать в виде формулы:

$$B^* = (A \rightarrow B) A^* \quad (4.17)$$

Интуитивная простота нечеткой логики как методологии разрешения проблем гарантирует ее успешное использование в системах анализа информации. При этом происходит подключение человеческой интуиции и опыта оператора.

В отличие от традиционной математики, требующей на каждом шагу моделирования точных и однозначных формулировок закономерностей, нечеткая логика предлагает совершенно иной уровень мышления, благодаря которому творческий процесс моделирования происходит на наивысшем уровне абстракции, при котором постулируется лишь минимальный набор закономерностей.

Нечеткие числа, получаемые в результате «не вполне точных измерений», во многом аналогичны распределениям теории вероятностей, но свободны от присущих последним недостатков: малое количество пригодных к анализу функций распределения, необходимость их принудительной нормализации, соблюдение требований аддитивности, трудность обоснования адекватности математической абстракции для описания поведения фактических величин. При возрастании точности нечеткая логика приходит к стандартной, булевой. По сравнению с

вероятностным методом, нечеткий метод позволяет резко сократить объем производимых вычислений, что, в свою очередь, приводит к увеличению быстродействия нечетких систем.

4.2.2 Основные понятия нечеткого управления

Нечеткое управление представляет собой применение теории нечетких множеств и нечеткой логики в системах управления различного назначения. В настоящее время для многих приложений, связанных с управлением различными процессами и явлениями, необходимо построение модели рассматриваемого процесса или явления. Знание модели позволяет подобрать соответствующие параметры управления. Однако часто построение корректной модели представляет собой трудную проблему, требующую иногда введения различных упрощений. Применение теории нечетких множеств и нечеткой логики для управления процессами не предполагает знания моделей этих процессов. Следует только сформулировать правила поведения в форме нечетких условных суждений типа IF ... THEN.

Данная методология обеспечивает достаточно простой способ делать определенные выводы и предположения, основанные на расплывчатости, неоднозначности и неточности, зашумленности или полного отсутствия входной информации. Основная идея этой методологии заключается в том, чтобы в процесс управления сложной динамической системой включить человеческие знания и опыт.

Основу нечеткого управления составляет база правил. База правил, иногда называемая лингвистической моделью, представляет собой множество нечетких правил $R^{(k)}$, $k = 1, \dots, N$, вида

$$R^{(k)} : \text{IF } (x_1 \text{ это } A_1^k \text{ AND } x_2 \text{ это } A_2^k \text{ AND } \dots \text{ AND } x_n \text{ это } A_n^k) \\ \text{THEN } (y_1 \text{ это } B_1^k \text{ AND } y_2 \text{ это } B_2^k \text{ AND } \dots \text{ AND } y_m \text{ это } B_m^k),$$

где N – количество нечетких правил;

A_i^k – нечеткие множества, $A_i^k \subseteq X_i \subset R$, $i = 1, \dots, n$;

B_j^k – нечеткие множества, $B_j^k \subseteq Y_j \subset R$, $j = 1, \dots, m$;

X_i , $i = 1, \dots, n$ – пространство входных переменных;

Y_j , $j = 1, \dots, m$ – пространство выходных переменных;

x_1, x_2, \dots, x_n – входные переменные лингвистической модели, причем $(\overline{x_1}, \overline{x_2}, \dots, \overline{x_n})^T = x \in X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$;

y_1, y_2, \dots, y_m – выходные переменные лингвистической модели, причем $(\overline{y_1}, \overline{y_2}, \dots, \overline{y_m})^T = y \in Y_1 \times Y_2 \times \dots \times Y_m$.

Необходимо отметить, что нечеткие правила $R^{(k)}$, $k = 1, \dots, N$ связаны между собою логическим оператором ИЛИ (OR). Кроме того, допустим, что выходы y_1, y_2, \dots, y_m взаимно независимы. Поэтому без утраты общности можно использовать нечеткие правила со скалярным выходом в форме:

$$R^{(k)}: \text{IF } (x_1 \text{ это } A_1^k \text{ AND } x_2 \text{ это } A_2^k \text{ AND } \dots \text{ AND } x_n \text{ это } A_n^k) \quad (4.18) \\ \text{THEN } (y \text{ это } B^k)$$

Каждое правило вида (4.17) состоит из части IF, которая называется посылкой (*antecedent*), и части THEN, называемой следствием (*consequent*). Посылка правила содержит набор условий, тогда как следствие содержит вывод. Переменные $(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n)^T$ и $(\bar{y}_1, \bar{y}_2, \dots, \bar{y}_m)^T$ могут принимать как лингвистические (например «малый», «средний», «большой»), так и числовые значения. Обозначив

$$X = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n, \\ A^k = A_1^k \times A_2^k \times \dots \times A_n^k,$$

то правило (4.17) можно представить в виде нечеткой импликации:

$$R^{(k)}: A^k \rightarrow B^k, \quad k = 1, \dots, N.$$

Типовая структура системы с нечетким управлением представлена на рис. 4.2. Как видно из рисунка, система состоит из нескольких компонентов: базы правил, рассмотренных выше, блока фаззификации (*fuzzification*), блока выработки решения, блока дефаззификации.

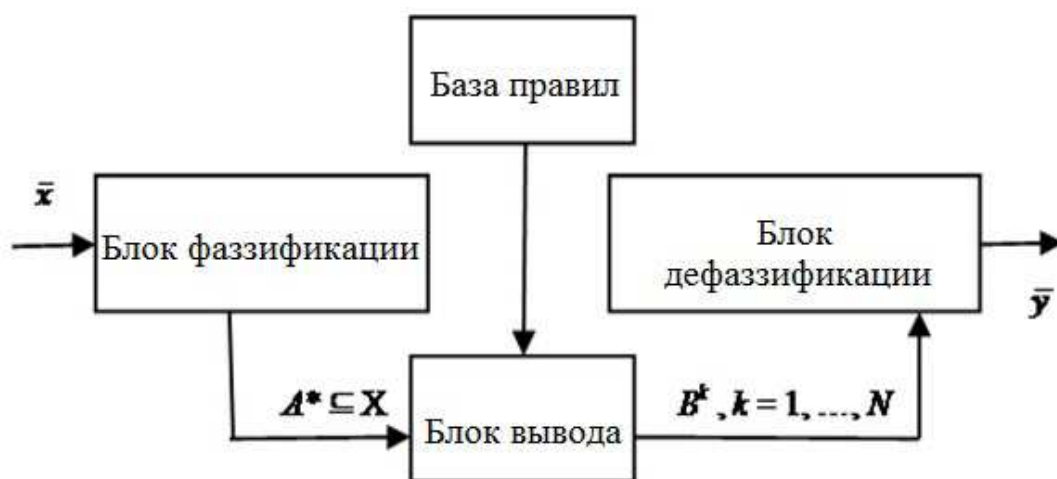


Рис. 4.10 – Структура системы с нечетким управлением

Система управления с нечеткой логикой оперирует нечеткими множествами. Поэтому конкретное значение $\bar{x} = (\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n)^T \in X$ входного параметра в системе с нечетким управлением подлежит операции

фаззификации, в результате которой значению \bar{x} будет сопоставлено нечеткое множество $A^* \in X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$.

В системах управления с нечеткой логикой входные данные имеют точные и определенные значения. Эти входные данные будут преобразованы в «нечеткие» значения, которые будут характеризоваться функцией принадлежности нечеткого множества. На первом этапе в системах управления, основанных на нечеткой логике, выполняется процесс фаззификации (*fuzzification process*). Как правило, на этапе фаззификации создается универсальное пространство лингвистических переменных (иными словами область рассуждения) для которых определяются функции принадлежности, позволяющие преобразовать точные и определенные значения входных данных в нечеткий формат.

Например, в п. 4.2.1 рассмотрен подход, использующий лингвистические переменные и линейную функцию принадлежности для определения такой пространственной характеристики как протяженность градостроительной системы на основе использования точных значений плотности населения.

Процесс фаззификации позволяет создать три нечетких терма, а именно, урбанизированная территория, частично урбанизированная территория и не урбанизированная территория. Таким же образом можно описать такую особенность ландшафта как уклон, а именно как плоский, умеренный, крутой и очень крутой.

На втором этапе в системах управления, основанных на нечеткой логике, необходимо разработать базу правил системы нечеткого логического вывода, которая в литературе называется лингвистической моделью [57, 62]. Реализация нечеткого вывода основана на нечетких продукционных правилах. Поэтому рассмотрение формализма нечетких продукционных моделей приобретает самостоятельное значение. Нечеткие правила наиболее близки к логическим моделям, но что очень важно, они адекватно отражают знания экспертов конкретной предметной области.

Обычно логические модели представляют набор простых утверждений «ЕСЛИ-ТО», которые в обобщенной форме можно представить в виде:

$$(i): Q; P; A \Rightarrow B; S, F, N ,$$

где (i) — имя нечеткой продукции;

Q — сфера применения нечеткой продукции;

P — условие применимости ядра нечеткой продукции;

$A \Rightarrow B$ — ядро нечеткой продукции, в котором A — условие ядра (или антецедент);

B — заключение ядра (или консеквент);

$\langle \Rightarrow \rangle$ — знак логической секвенции (или следования);

S — метод или способ определения количественного значения степени истинности заключения ядра;

F — коэффициент определенности или уверенности нечеткой продукции;

N — постусловия продукции.

Например, несложное правило "if-then" для планирования и управления развитием городской системы может быть выражено следующим образом:

IF уклон рельефа местности слишком крутой,
THEN развитие, улучшение данной местности будет очень
 медленным.

В системах нечеткого вывода последним этапом является процесс дефаззификации (*defuzzification process*). Процесс дефаззификации представляет собой процедуру или процесс нахождения обычного (не нечёткого) значения для каждой из выходных лингвистических переменных. Цель дефаззификации заключается в том, чтобы используя результаты аккумуляции всех выходных лингвистических переменных, получить обычное количественное значение каждой из выходных переменных, которое может быть использовано специальными условиями, внешними по отношению к системе нечёткого вывода. Простейшим способом выполнения процедуры дефаззификации является выбор четкого числа, соответствующего максимуму функции принадлежности.

Нечеткие множества и нечеткая логика обеспечивают не количественный, не математический, и не статистический подход к моделированию сложных систем. Нечеткая логика представляет набор нестрогих правил, в которых для достижения поставленной цели могут использоваться радикальные идеи, интуитивные догадки, а также опыт специалистов, накопленный в соответствующей области. Нечеткой логике свойственно отсутствие строгих стандартов. Чаще всего она применяется в экспертных системах, нейронных сетях и системах искусственного интеллекта, обеспечивающих принятие решений, связанных с развитием территориальных систем.

4.2.3 Нечеткое управление в моделях развития градостроительных систем, основанных на однородных структурах

Клеточные автоматы представляют динамические системы, в которых локальные функции переходов управляют изменением состояния единичных z -автоматов из одного в другой, и эти локальные функции переходов могут быть детерминированными. Такие детерминированные правила применяются в рассмотренной ОС-модели «Жизнь» в разделе 3.

В детерминированных КА состояние единичного z -автомата в последующий момент времени однозначно определяется состоянием этого z -автомата и его ближайших соседей, определяющихся на основании индекса соседства Мура в предыдущий момент времени. В этом случае состояние данного элемента в момент времени $t+1$ является однозначной функцией f от двух переменных — состояния самого z -автомата и суммы состояний его ближайших соседей в предшествующий момент времени t . При таком определении клеточный автомат не обладает памятью. Клеточные автоматы с памятью можно получить, предположив, что функция f зависит, например, также от состояния z -автомата в момент времени $t-1$.

Для моделирования динамики социальных систем более подходят клеточные автоматы, у которых правила переходов могут быть недетерминированными.

Например, в градостроительных системах, несмотря на понимание того, что топографические особенности влияют на городское развитие, не корректно утверждать, что «территория с уклоном выше 10 градусов не имеет природно-ресурсного потенциала для своего развития». Обычно для планирования развития городской территории используется в первую очередь территория с плоским ландшафтом. Сложный рельеф местности может быть использован для развития городской территории при наличии определенных существенных условий.

Практика показывает, что характер рельефа играет большую роль в определении местоположения и особенно при решении задач преобразования рельефа территории для приспособления его к нуждам застройки, благоустройству и инженерно-транспортным нуждам. Характер рельефа играет большую роль при обеспечении высотного решения площадей, улиц, проездов; размещение зданий, сооружений и подземных коммуникаций; реализации возможности стока ливневых вод и канализации.

При этом необходимо учитывать многообразные факторы. Некоторые из них присущи давно минувшим историческим периодам и объясняются

спецификой политической жизни, развитием науки и техники. Другие факторы сохраняют актуальность и в настоящее время, активно воздействуя на развитие градостроительных систем. В таблице 4.1 приведены основные причины развития городов в условиях сложного рельефа [72].

В большинстве случаев на развитие конкретного города либо территории действует как единовременно, так и в разные периоды его существования ряд причин. Иногда приведенные причины – только первичны, а города в дальнейшем продолжают развиваться, приобретая новые функции, являющиеся производными от первоначальных.

Таблица 4.1 – Основные причины развития городов и территорий в условиях сложного рельефа

Причины, определяющие местоположение городов в районах с холмистым и горным рельефом	Причины, определяющие местоположение городов на конкретной территории со сложным рельефом
1	2
1. Создание удобного судоходства глубоководного морского порта в районе с горным или холмистым характером побережья	1. Полное отсутствие в районе значительных равнинных территорий
2. Разработка месторождения полезных ископаемых в горном районе	2. Занятость всех равнинных территорий района существующей городской застройкой или другими видами землепользования большой ценности
3. Строительство гидроэлектростанций в горном районе	3. Большая пригодность территории со сложным рельефом для застройки по сравнению с равнинными участками, имеющими неблагоприятные грунты, микроклимат, затопляемость и т. д.
4. Развитие в горном районе лечения, отдыха и туризма	4. Целесообразность резервирования равнинных участков для промышленного строительства
5. Наличие благоприятных условий для орошения предгорий ледниковыми водами	
6. Создание опорного центра сети поселений в районах с горным или холмистым рельефом	
7. Лучшие климатические условия возвышенного района в тропической зоне	

Вследствие этого, причины которые характеризуют природно-ландшафтные ограничения на развитие территории можно отнести к недетерминированным факторам городского развития, которые не могут быть представлены только двоичной логикой (двузначной логикой), основанной на двух утверждениях «ДА» или «НЕТ».

Основываясь на принципе детерминизма, согласно которому все существующее, во-первых, чем-то однозначно обусловлено, и, во-вторых, во всём полностью определён, можно рассматривать правила игры *Life* как детерминированные, как это было рассмотрено выше. Жизнь клеток в ОС-пространстве подчиняется нескольким простым правилам:

- если у ячейки, находящейся в состоянии «жизнь», меньше двух соседей (по вертикали, горизонтали, диагонали), то ячейка переходит в состояние «гибели»;

- если у ячейки, находящейся в состоянии «жизнь», больше трех соседей, то эта ячейка переходит в состояние «гибели»;

- если у ячейки, находящейся в состоянии «гибели» ровно три ячейки в состоянии «жизнь», то ячейка переходит в состояние «жизнь»;

- если у ячейки, находящейся в состоянии «жизнь», ровно два соседа, то состояние ячейки не изменяется.

Учитывая принцип недетерминизма, то есть неоднозначную обусловленность, либо неполную определённость, или и то, и другое вместе, правила можно изменить на недетерминированные, например как:

- если ячейка ОС-пространства в состоянии «жизнь» *изолирована* или соседство данной ячейки *переполнено* (по вертикали, горизонтали, диагонали), то ячейка переходит в состояние «гибели»;

- если ячейка ОС-пространства в состоянии «жизнь» и соседство данной ячейки *не переполнено* (по вертикали, горизонтали, диагонали), то ячейка остается в состоянии «жизнь»;

- если ячейка ОС-пространства в состоянии «гибели» и в соседстве с данной ячейки *достаточное количество* ячеек в состоянии «жизнь» (по вертикали, горизонтали, диагонали), то ячейка перейдет в состояние «жизнь».

Используя нечеткие лингвистические переменные, такие как «значительное скопление», «изоляция», «переполнение» и «достаточное количество» локальные функции перехода, которые управляют изменением состояния каждого единичного *z*-автомата, становятся нечеткими в отличие от классической двоичной логики.

Такие нечеткие локальные функции перехода могут быть представлены в виде нечетких утверждений IF-THEN:

Утверждение 1:

IF единичный z -автомат, не имеющий вокруг себя *значительного количества* соседних z -автоматов,

THEN выживает и остается в состоянии «жизнь» в следующем поколении;

Утверждение 2:

IF единичный z -автомат, находящийся в *изоляции* или имеет *переполнение* соседними z -автоматами,

THEN переходит в состояние «гибели» в следующем поколении;

Утверждение 3:

IF единичный z -автомат, находящийся в состоянии «гибели» и имеющий вокруг себя *достаточное количество* соседних z -автоматов в состоянии «жизнь»,

THEN единичный z -автомат переходит в состояние «жизнь» в следующем поколении.

Градостроительное развитие представляет собой сложное пространственное явление, на которое воздействует значительное количество внешних факторов. Географические условия городской территории, социо-экономические факторы территории, степень обеспеченности инфраструктурой, демографическая характеристика территории, возможность роста демографических показателей, ограничения, обусловленные планированием и зонированием городской территории оказывают влияние на процесс городского развития как во взаимодействии друг с другом, так и индивидуально. Тем не менее, ни один из этих факторов, воздействующих на процесс развития градостроительной системы, не обладает свойством детерминизма. Другими словами, процесс пространственного развития городской системы не может быть представлен средствами только двоичной логики.

Например, вместо утверждения «на территории с уклоном рельефа 10 градусов и выше нельзя выполнить процесс предпроектных и подготовительных работ под застройку типовыми жилыми домами» в условиях нечетких утверждений можно заменить на новое утверждение «развитие *возможно* на территориях с *крутым* рельефом местности». С использованием лингвистических переменных, локальные функции перехода становятся нечеткими и полностью определяются принципами

нечеткой логики. Вследствие вышесказанного, дальнейшее развитие возможностей моделирования процессов и явлений развития градостроительных систем, а также разработки сценариев развития территорий возможно на основе интеграции *ОС*-моделей и нечетких систем управления.

4.3 Совершенствование *ОС*-моделей развития градостроительных систем на основе нечеткой логики

В предыдущих подразделах обсуждался вопрос представления процесса градостроительного развития как нечеткого процесса, который находится под влиянием большого количества не детерминированных факторов. Такой процесс удобней представить с позиций нечеткой системы управления. В терминах и понятиях нечеткой системы управления точные значения входных переменных процесса развития городского пространства должны быть преобразованы в значения лингвистических переменных посредством применения некоторых положений теории нечетких множеств, а именно – при помощи определенных функций принадлежности.

4.3.1 Временной аспект процесса градостроительного развития городских территорий

Градостроительное развитие городских территорий представляет собой процесс непрерывного изменения состояния территории из не урбанизированной или частично урбанизированной территории к урбанизированной, причем граница перехода между различными состояниями городской территории не носит явно выраженный характер. В связи с этим, теория нечетких множеств может быть эффективно применима для моделирования нечеткой природы процесса градостроительного развития.

Подобно пространственному процессу развития, процесс градостроительного развития территории во времени тоже можно отнести к непрерывному процессу.

В общем процесс градостроительного развития городских территорий во времени проходит в соответствии с логистической кривой, которая моделирует кривую роста вероятности некоторого события, по мере изменения управляющих параметров (в нашем случае факторов, оказывающих влияние на процесс градостроительного развития).

Предположим, что несколько n лет понадобится для градостроительного освоения территории. Основываясь на понимании

логистической кривой, которая характеризует процесс градостроительного развития, отношение между состоянием ячеек в нечетко-множественном *ОС*-пространстве градостроительной системы и временем развития городской территории математически может быть представлено выражением:

$$\mu_{S_{urban}}(x_{i,j}^t) = \begin{cases} 0 & t_{x_{i,j}} = 0 \\ \frac{1}{a + b \cdot \exp(-c \cdot t_{x_{i,j}})} & 0 < t_{x_{i,j}} < n \\ 1 & t_{x_{i,j}} = n \end{cases}, \quad (4.19)$$

где $\mu_{S_{urban}}(x_{i,j}^t)$ – функция принадлежности единичного клеточного автомата $x_{i,j}^t$ в момент времени t нечеткого *ОС*-пространства городской территории;

$t_{x_{i,j}}$ – обозначает t -й период времени (в годах) развития единичного клеточного автомата $x_{i,j}^t$ в процессе развития городской территории;

a , b и c параметры логистической функции, которая определяет форму логистической кривой.

Изучение логистической функции показывает, что форма логистической кривой не чувствительна к изменениям параметров a и b ; в то же время логистическая кривая в значительной степени зависит от параметра c (рис. 4.12). Более того, параметр c непосредственно связан с временным параметром (количеством лет), который определяет длительность процесса развития градостроительной системы. Например, если процесс развития градостроительной системы имеет длительный интервал времени, то параметр c принимает минимальное значение и наоборот, чем короче период развития территории градостроительной системы, тем больше значение параметра c .

С практической точки зрения параметр c может быть определен как $c = \psi / n$, где ψ – постоянная величина, а n – общее количество лет в течение которых территория из не урбанизированного состояния переходит в урбанизированное. На рис. 4.12 показана зависимость логистической кривой от параметра c . На рисунке показано, что функция принадлежности нечеткого *ОС*-пространства городской территории; зависит от параметра c логистической функции.

С учетом $c = \psi / n$ выражение 4.19 можно записать в виде:

$$\mu_{S_{urban}}(x_{i,j}^t) = \begin{cases} 0 & t_{x_{i,j}} = 0 \\ \frac{1}{a + b \cdot \exp(-\frac{\psi \cdot t_{x_{i,j}}}{n})} & 0 < t_{x_{i,j}} < n, \\ 1 & t_{x_{i,j}} = n \end{cases} \quad (4.20)$$

Параметры a , b , ψ , и n в уравнении 4.20 необходимо калибровать и подбирать для учета особенностей реальных процессов развития, то есть с учетом особенностей градостроительных систем. Уравнение 4.20 можно переписать в виде выражения 4.21, чтобы вычислить t -й период времени (в годах) развития единичного клеточного z -автомата $x_{i,j}$ в процессе развития городской территории, учитывая его текущее состояние в нечетком OC -пространстве:

$$t_{x_{i,j}} = \begin{cases} 0 & \mu_{S_{urban}}(x_{i,j}^t) = 0 \\ \left[\ln(b) - \ln\left(\frac{1}{\mu_{S_{urban}}(x_{i,j}^t)} - a\right) \right] \cdot n / \psi & 0 < \mu_{S_{urban}}(x_{i,j}^t) < 1, \\ 1 & \mu_{S_{urban}}(x_{i,j}^t) = 1 \end{cases} \quad (4.21)$$

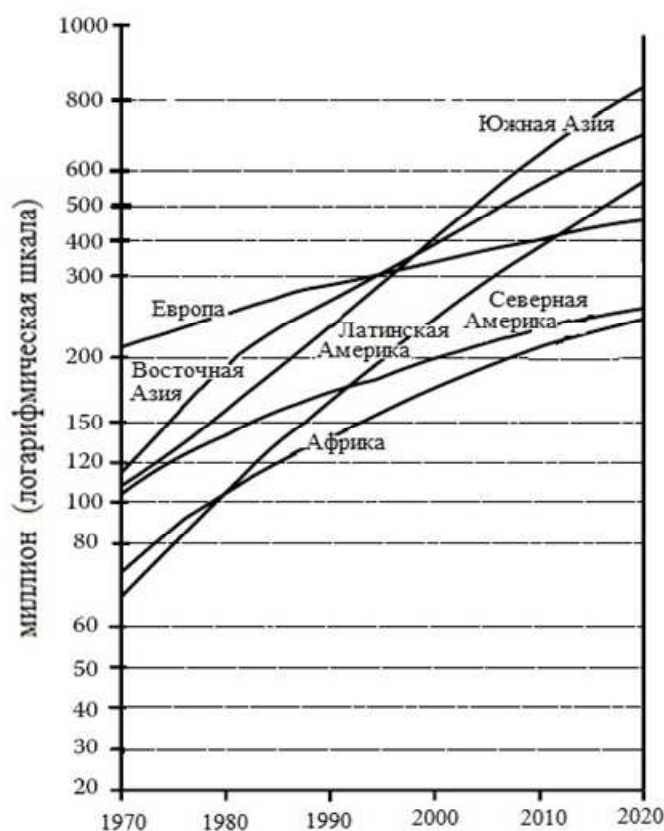


Рис. 4.11 – Логистическая кривая развития градостроительных систем с 1950 по 2000 года. По оси y – население в миллионах, x – ось времени.

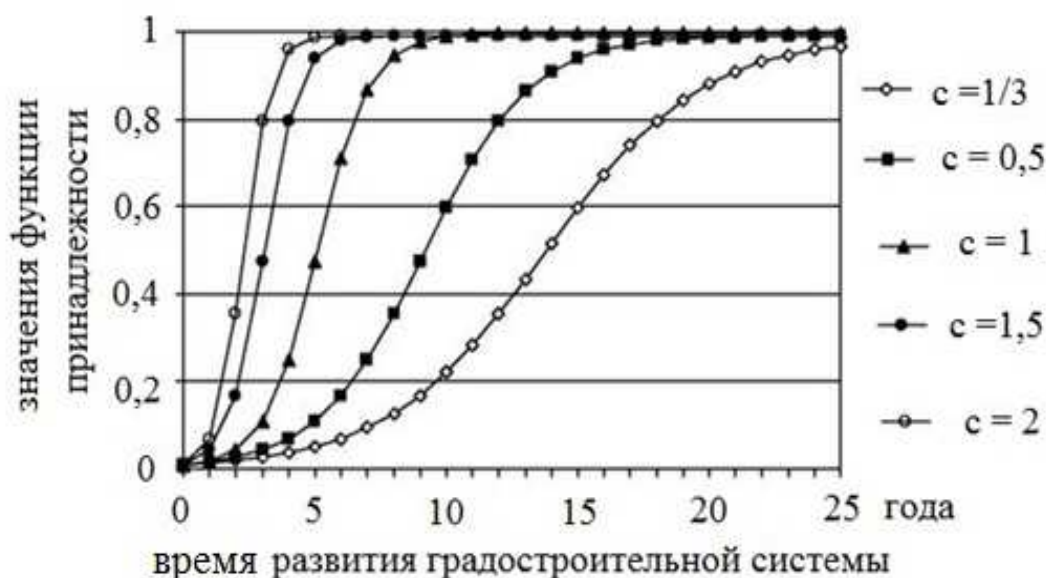


Рис. 4.12 – Зависимость логистической кривой от ее параметров

Для каждого единичного z -автомата $x_{i,j}^t$, значение функции принадлежности $\mu_{Urban}(x_{i,j}^t)$ в нечетком OC -пространстве городской территории может быть вычислено с использованием функции принадлежности, показанной на рис. 4.12.

Поэтому, зная текущее состояние $x_{i,j}^t$, время на t -й период процесса развития данного единичного z -автомата $t_{x_{i,j}}$ может быть вычислено в соответствии с выражением 4.21.

4.3.2 Развитие градостроительной системы как нечеткий процесс

Очевидно, чтобы участок городской территории, который в модели представлен в виде множества единичных клеточных автоматов OC -пространства, прошел различные этапы урбанизации и получил статус урбанизированной территории, процесс развития происходит с определенной скоростью, которая может быть быстрой или медленной, и зависит от множества воздействующих внешних факторов. Такими факторами может быть как состояние (потенциал) единичного клеточного автомата $(x_{i,j})$, который является элементом OC -пространства моделируемой территории, географические условия исследуемой территории, социально-экономический статус территории, а также функции планирования и управления развитием территории, в результате

чего изменяется скорость развития самой территории в пространстве и во времени.

Например, в быстро развивающемся районе с развитой инфраструктуры и транспортного обеспечения, процесс развития будет быстрее, чем в зоне без достаточной инфраструктуры снабжения и транспортного обеспечения. Скорость развития может существенно изменяться в зависимости от характеристик территории на региональном и муниципальном уровне.

Рассмотрим лингвистическую переменную *скорость урбанизации территории*:

Ω – «скорость урбанизации территории»;

U – множество целых чисел из интервала $[0, 35]$;

$T(\Omega)$ – значения «медленно», «умеренно», «быстро». Для каждого значения «медленно», «умеренно» и «быстро» необходимо задать функцию принадлежности, которая определяет, какой интервал времени считать медленным, умеренным и быстрым;

G – модификаторы «чрезвычайно» и «очень». Модификаторы позволяют образовывать новые значения: «чрезвычайно быстро», «очень медленно» и пр.

Средняя скорость процесса урбанизации территории может занимать до 20 лет, тогда как быстрый процесс занимает от 10 до 15 лет. Таким же образом медленный процесс урбанизации может занимать от 20 до 35 лет или больше, если процесс урбанизации территории более медленный.

Предположим, что максимальный показатель урбанизированности городской территории достигается в течение 30 и более лет. Чтобы представить постепенное изменение скорости процесса урбанизации во времени используется нечеткие функции принадлежности для моделирования скорости урбанизации на каждом этапе развития градостроительной системы.

На практике удобно использовать те функции принадлежности, которые допускают аналитическое представление в виде некоторой простой математической функции. Это упрощает не только соответствующие численные расчеты, но и сокращает вычислительные ресурсы, необходимые для хранения отдельных значений этих функций принадлежности.

Для примера рассмотрим функцию принадлежности, которая состоит из отрезков прямых линий, образуя непрерывную или кусочно-

непрерывную функцию. Наиболее характерной является «треугольная» (рис. 4.13.) функция принадлежности. В нашем случае каждая из этих функций задана на универсуме $X=[0, 10]$, в качестве которого выбран замкнутый интервал действительных чисел. В общем случае выбор универсума может быть произвольным, и не ограничен никакими правилами.

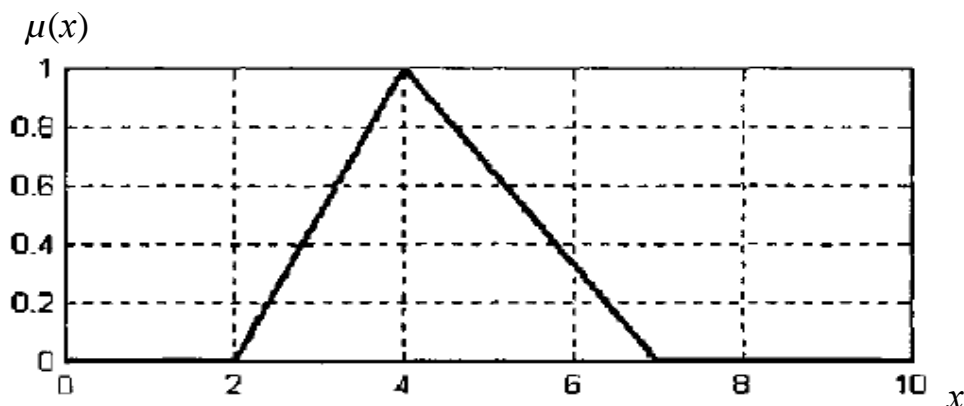


Рис. 4.13– График кусочно-непрерывной функции принадлежности «треугольная»

Функция принадлежности в общем виде может быть задана аналитически следующим выражением:

$$\mu(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (4.22)$$

Обозначим через $\mu_{\text{чрезвычайно_быстро}}$, $\mu_{\text{очень_быстро}}$, $\mu_{\text{быстро}}$, $\mu_{\text{умеренно}}$, $\mu_{\text{очень_медленно}}$, $\mu_{\text{чрезвычайно_медленно}}$ и функции принадлежности значений лингвистической переменной *скорость урбанизации территории*: «чрезвычайно быстро», «очень быстро», «быстро», «умеренно», «медленно», «очень медленно» и «чрезвычайно медленно». Различные функции принадлежности, характеризующие темпы изменения процесса урбанизации градостроительной системы показано на рис. 4.14. Соответственно, эти семь значений лингвистической переменной (термов) могут быть определены следующим образом:

Чрезвычайно быстро: если процесс урбанизации городской территории завершается в течение 5 лет, то такое развитие городского пространства следует отнести к чрезвычайно быстрому. Вследствие этого, скорость изменения городской территории будет соответствовать состоянию «чрезвычайно быстро», в этом случае значение функции

принадлежности равно единице. Однако если процесс урбанизации занимает от 5 до 10 лет, то скорость урбанизации городской территории будет соответствовать состоянию «чрезвычайно быстро» в соответствии с выражением (4.23):

$$x_{i,j}^t = \begin{cases} 1, & n \leq 5 \\ 2 - 0,2n, & 5 < n \leq 10 \end{cases} \quad (4.23)$$

Очень быстро и быстро: Подобно определению «чрезвычайно быстро», значения «очень быстро» и «быстро» лингвистической переменной *скорость урбанизации территории* соответствуют интервалам от 5 до 15 лет и от 10 до 20 лет, соответственно, функция принадлежности принимает максимальное значение 1 в моменты времени 10 и 15 лет соответственно.

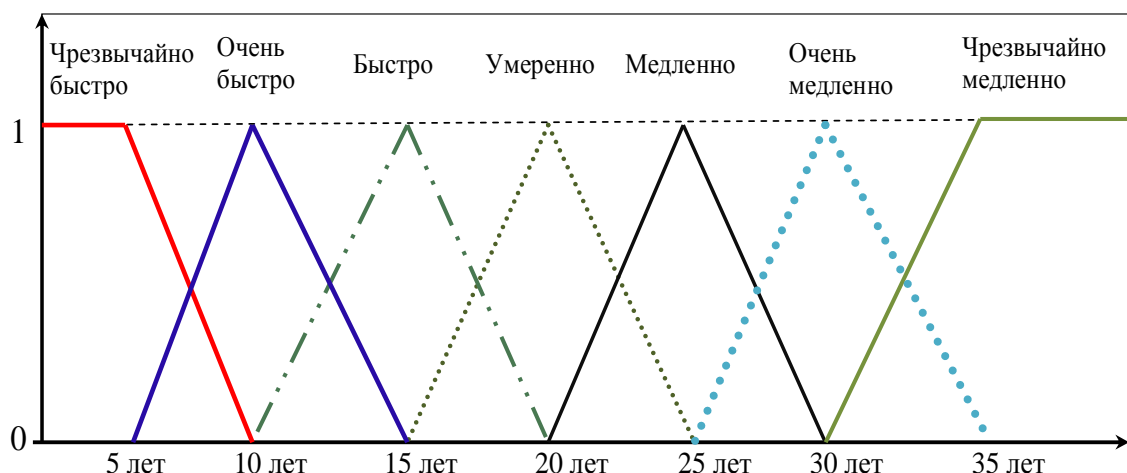
$$x_{i,j}^t = \begin{cases} -1 + 0,2n, & 5 < n \leq 10 \\ 3 - 0,2n, & 10 < n \leq 15 \end{cases} \quad (4.24)$$

$$x_{i,j}^t = \begin{cases} -2 + 0,2n, & 10 < n \leq 15 \\ 4 - 0,2n, & 15 < n \leq 20 \end{cases} \quad (4.25)$$

Умеренно: Значение лингвистической переменной «умеренно» соответствует временному диапазону от 15 до 25 лет и функция принадлежности принимает максимальное значение 1 в 20-летний период урбанизации исследуемой территории.

$$x_{i,j}^t = \begin{cases} -3 + 0,2n, & 15 < n \leq 20 \\ 4 - 0,2n, & 20 < n \leq 25 \end{cases} \quad (4.26)$$

$\mu(x)$



время (годы)

Рис. 4.14 – Различные функции принадлежности, характеризующие темпы изменения процессов урбанизации

Медленно и очень медленно: Значение лингвистической переменной "медленно" охватывает диапазон от 20 до 30 лет, и ее функция принадлежности принимает значение 1, когда процесс развития города достигнет 25-летней отметки. Подобным образом, значение лингвистической переменной «очень медленно» охватывает интервал времени от 25 до 30 лет, и ее функция принадлежности принимает значение единицы, когда процесс урбанизации градостроительной системы достигнет 30-летней отметки.

$$x_{i,j}^t = \begin{cases} -4 + 0,2n, & 20 < n \leq 25 \\ 6 - 0,2n, & 25 < n \leq 30 \end{cases} \quad (4.27)$$

$$x_{i,j}^t = \begin{cases} -5 + 0,2n, & 25 < n \leq 30 \\ 7 - 0,2n, & 30 < n \leq 35 \end{cases} \quad (4.28)$$

Чрезвычайно медленно: Процесс урбанизации можно в нашем случае рассматривать как чрезвычайно медленный, если он превышает интервал времени более 30 лет, в этом случае функция принадлежности значения лингвистической переменной «чрезвычайно медленно» принимает максимальное значение после 35-летней отметки. Поэтому,

$$x_{i,j}^t = \begin{cases} -6 + 0,2n, & 30 < n \leq 35 \\ 1, & n > 35 \end{cases} \quad (4.29)$$

Конечно, различные эксперты могут по-разному оценивать и классифицировать скорость изменения темпов процесса урбанизации как быструю, умеренную, медленную и так далее. Поэтому, имея некоторую систему функций принадлежности, возможно повысить достоверность моделирования и реалистичность темпов процесса урбанизации городской территории. Применение нечеткомножественного подхода позволяет для каждой рассматриваемой скорости темпов процессов урбанизации обеспечить непрерывный переход из состояния «очень быстро» к состоянию «быстро», или от состояния «умеренно» к состоянию «медленно».

4.3.3 Локальные функции перехода z-автомата и логический вывод

С целью определения локальных функций перехода, которые будут использоваться для управления процессом городского развития,

предположим, что сам процесс урбанизации городской территории необратим, то есть, развитие идет по направлению: от не городского состояния территории до частично городской и затем полностью урбанизированной территории, кроме того, не наблюдается никакого процесса антиурбанизации. Как только ячейка моделируемого *ОС*-пространства территории имеет высокую степень урбанизации, то она принимает статус городской территории. С учетом указанных предположений и допущений матрица условий перехода из не городского к частично городскому состоянию и затем полностью урбанизированной территории, которая соответствует статусу городской территории, представлено в таблице 4.2.

Согласно принципам теории однородных структур, состояние единичного z -автомата в момент времени t зависит от состояний всех соседних ему z -автоматов (согласно индексу соседства X) на предыдущем временном шаге и определяется локальными функциями переходов – $\tau^{(n)}$. Этот принцип теории однородных структур является фундаментальным правилом для формирования локальных функций переходов, которые применяются для моделирования развития градостроительных систем, представленных в терминах и понятиях нечетких множеств.

Если состояние единичного z -автомата характеризуется значительным потенциалом к развитию то и процесс развития может получить достаточную поддержку от потенциала соседних z -автоматов согласно индексу соседства X , то такой z -автомат в городском *ОС*-пространстве может изменить свое состояние на более высокое.

Однако процесс урбанизации территории может быть значительно замедлен, если состояние единичного z -автомата характеризуется низким потенциалом, или потенциал соседних z -автоматов согласно индексу соседства X не может обеспечить достаточную поддержку развитию единичного z -автомата. С другой стороны, это развитие может также быть ускорено, если единичный z -автомат *ОС*-пространства имеет высокий потенциал к развитию, и/или получает значительную поддержку от соседних z -автоматов в соответствии с индексом соседства X .

Динамика классических d -*ОС* полностью определяется в терминах ЛФП – локальных взаимодействий автоматов шаблона соседства каждого единичного z -автомата, а сама ЛФП представляет собой типичный пример локального алгоритма, который выполняется на основе информации о состояниях единичных z -автоматов из локальной окрестности

(определяемой индексом соседства) текущего z -автомата Z^d –пространства OC -модели.

Использование серии утверждений «IF-THEN» позволяет сформулировать правила, которые можно определить как основные правила, которые позволяют вычислить следующее состояние текущего единичного z -автомата структуры.

Запишем правила переходов в виде утверждений:

Утверждение 1 (УТ1)

IF единичный z -автомат OC -модели территории с *низким* уровнем урбанизированности, имеет *высокий* природно-ресурсный потенциал (ПРП),
AND все z -автоматы-соседи, входящие в шаблон соседства (ШС) X , имеют ПРП *выше* относительно центрального автомата ШС,
THEN единичный z -автомат OC -модели будет иметь *среднюю* скорость урбанизации территории.

Утверждение 2 (УТ2)

IF единичный z -автомат OC -модели территории с *низким* уровнем урбанизированности, имеет *высокий* природно-ресурсный потенциал (ПРП),
AND все z -автоматы-соседи, входящие в шаблон соседства (ШС) X , имеют ПРП *ниже* относительно центрального автомата ШС,
THEN единичный z -автомат OC -модели будет иметь *медленную* скорость урбанизации территории.

Утверждение 3 (УТ3)

IF единичный z -автомат OC -модели территории с *низким* уровнем урбанизированности, имеет *слабый* природно-ресурсный потенциал (ПРП),
AND все z -автоматы-соседи, входящие в шаблон соседства (ШС) X , имеют ПРП *выше* относительно центрального автомата ШС,
THEN единичный z -автомат OC -модели будет иметь *медленную* скорость урбанизации территории.

Утверждение 4 (УТ4)

IF единичный z -автомат OC -модели территории с *низким* уровнем урбанизированности, имеет *слабый* природно-ресурсный потенциал (ПРП),

AND все z -автоматы-соседи, входящие в шаблон соседства (ШС) X ,
ОС-модели территории с **низким** уровнем
урбанизированности,
THEN единственный z -автомат ОС-модели будет иметь **очень
медленную** скорость урбанизации территории.

Утверждение 5 (УТ5)

IF единственный z -автомат ОС-модели **не урбанизированной**
территории,
AND все z -автоматы-соседи, входящие в шаблон соседства (ШС) X ,
ОС-модели **высоко урбанизированной** территории,
THEN единственный z -автомат ОС-модели будет иметь **медленную**
скорость урбанизации территории.

Утверждение 6 (УТ6)

IF единственный z -автомат ОС-модели **не урбанизированной**
территории,
AND все z -автоматы-соседи, входящие в шаблон соседства (ШС) X ,
ОС-модели территории с **низким** уровнем
урбанизированности,
THEN единственный z -автомат ОС-модели будет иметь **очень
медленную** скорость урбанизации территории.

Рассмотренная продукционная модель может быть дополнена определенным порядком, вводимым на множестве продукций, что упрощает механизм логического вывода. Порядок может выражаться в том, что отдельная следующая по порядку продукция может применяться только после попыток применения предшествующих ей продукций.

Если единственный z -автомат ОС-модели имеет значение функции принадлежности 70% урбанизированности городской территории, то такая ячейка может рассматриваться как имеющая потенциал для перспективного развития в будущем. Если все z -автоматы-соседи, входящие в шаблон соседства X , единственный z -автомат ОС-модели имеют значение функции принадлежности 0,8 и выше в нечетко-множественной ОС-модели территории, то такая ячейка имеет высокий потенциал для дальнейшего пространственного развития градостроительной системы. Данная ситуация соответствует утверждению 1, рассмотренному выше.

Однако, как возможно интерпретировать ситуацию, если значение функции принадлежности z -автомата ОС-модели принимает значение 0,5 и

все z -автоматы-соседи, входящие в шаблон соседства X , имеют значение 0,5? В таком случае на основе метода параметрического обучения, который позволяет формировать продукционные правила с коэффициентом уверенности и весами в виде регулируемых порогов срабатывания правил, необходимо определить минимальный коэффициент уверенности. Коэффициенты уверенности регулируют срабатывания правил, которые могут иметь место только при превышении установленного порога по коэффициенту уверенности условия.

Обозначим $x_{i,j}$ – единичный z -автомат OC -модели, $\mu_{S_{urban}}$ – значение функции принадлежности в нечеткомножественной OC -модели, ороговое значение функции принадлежности или, иными словами, такое минимальное значение функции принадлежности, при котором единичный z -автомат получает потенциал к изменению своего состояния в будущем.

Обозначим $\Omega_{x_{i,j}}$ – все z -автоматы-соседи, входящие в шаблон соседства X , $\mu_{\max S_{urban}}(\Omega_{x_{i,j}})$ – максимальное значение функции принадлежности для всех z -автоматов-соседей, входящих в шаблон соседства X в нечеткомножественной OC -модели.

Следовательно, шесть рассмотренных ранее первичных правил перехода могут быть представлены с использованием терминологии нечетких множеств, то есть в виде функций принадлежности для каждого единичного z -автомата нечеткомножественной OC -модели территории.

Первичная локальная функция перехода (ПЛФП)1:

$$\text{IF } \mu_{S_{urban}}(x_{i,j}) \geq \mu_0 \text{ AND } \mu_{\max S_{urban}}(\Omega_{x_{i,j}}) > \mu_{S_{urban}}(x_{i,j})$$

THEN единичный z -автомат OC -модели будет иметь **среднюю** скорость урбанизации территории.

ПЛФП 2, ПЛФП 3:

$$\text{IF } \mu_{S_{urban}}(x_{i,j}) \geq \mu_0 \text{ AND } \mu_0 \leq \mu_{\max S_{urban}}(\Omega_{x_{i,j}}) < \mu_{S_{urban}}(x_{i,j})$$

$$\text{OR } 0 < \mu_{S_{urban}}(x_{i,j}) \leq \mu_0 \text{ AND } \mu_{\max S_{urban}}(\Omega_{x_{i,j}}) > \mu_{S_{urban}}(x_{i,j})$$

THEN единичный z -автомат OC -модели будет иметь **медленную** скорость урбанизации территории.

ПЛФП 4:

$$\text{IF } 0 < \mu_{S_{urban}}(x_{i,j}) \leq \mu_0 \text{ AND } 0 < \mu_{\max S_{urban}}(\Omega_{x_{i,j}}) < \mu_{S_{urban}}(x_{i,j})$$

THEN единичный z -автомат OC -модели будет иметь **очень медленную** скорость урбанизации территории.

ПЛФП 5:

IF $\mu_{S_{urban}}(x_{i,j}) = 0$ AND $\mu_{\max S_{urban}}(\Omega_{x_{i,j}}) \approx 1$

THEN единичный z-автомат ОС-модели будет иметь *медленную* скорость урбанизации территории.

ПЛФП 6:

IF $\mu_{S_{urban}}(x_{i,j}) = 0$ AND $\mu_0 \leq \mu_{\max S_{urban}}(\Omega_{x_{i,j}}) < 1$

THEN единичный z-автомат ОС-модели будет иметь *очень медленную* скорость урбанизации территории.

Дополнительно к вышеперечисленным локальным функциям, определяющим правила изменения состояний единичного z-автомата ОС-модели можно сформулировать правила, которые не обеспечивают условия для развития градостроительной системы, то есть изменение состояний единичного z-автомата не происходит.

Первичные локальные функции переходов рассматривают и учитывают идеальную ситуацию, когда состояние элементарной ячейки зависит только от собственного состояния ячейки и состояний соседних ячеек в соответствии с выбранным шаблоном соседства.

На практике процесс пространственно-временного развития городской системы зависит от большого количества разнообразных факторов, таких, как топографические условия, состояние и развитость транспортной сети, социально-экономические факторы, кроме того, от генерального плана развития города и результатов принятых решений человеком, которые в большинстве случаев являются генерацией возможных альтернативных решений.

Некоторые факторы, такие, как состояние и обеспеченность территории инженерной инфраструктурой, разветвленность транспортной сети могут ускорять процесс развития градостроительной системы, другие, такие как сложный природный ландшафт или территории с недостаточным уровнем обеспеченности города инженерной инфраструктурой могут выполнять роль факторов, тормозящих процесс развития градостроительного пространства. Все факторы и ускоряющие процесс развития и замедляющие этот процесс как во времени, так и в пространственном отношении должны быть учтены при формировании локальных функций перехода.

Таким образом, факторы, ускоряющие или замедляющие процесс развития городской системы могут рассматриваться как вторичные локальные функции перехода, модифицирующие первичные, и определяющие состояние каждого z -автомата ОС-модели в момент времени t на основе состояний всех соседних ему z -автоматов (согласно X -индексу соседства) в момент времени $(t-1)$.

Общие принципы формирования локальных функций перехода можно сформулировать следующим образом: если состояние z -автоматов ОС-модели, с которыми данный единичный z -автомат непосредственно связан информационными каналами определяется ускоряющими факторами, то скорость изменения состояния этого z -автомата будет на шаг выше в нечеткомножественном определении термина «скорость». Например, от скорости развития «умеренной» к «очень быстрой», от скорости «чрезвычайно медленной» к «медленной».

С другой стороны, если существуют ограничивающие факторы, определяющие состояние соседних автоматов, то скорость изменения состояния z -автомата будет на шаг ниже в нечетко-множественном определении термина «скорость». Например, от скорости развития «чрезвычайно быстрой» к «очень быстрой» от скорости «умеренно» к скорости изменения «медленной».

В случае существования более чем одного фактора, то скорость изменения состояния градостроительной системы будет ускоряться или замедляться в соответствии с количеством ограничивающих факторов. С другой стороны, существование одновременно как ускоряющих факторов, так и факторов замедляющих процесс городского развития ведет к неизменяемости процесса городского развития.

В соответствии с вышеизложенными рассуждениями следующие локальные функции перехода могут быть рассмотрены в качестве ускоряющих и замедляющих факторов, в целом, влияющих на скорость развития градостроительной системы.

Вторичная локальная функция перехода 1 (ВЛФП 1):

- | | |
|------|--|
| IF | единичный z -автомат ОС-модели имеет <i>умеренную</i> скорость урбанизации, |
| AND | на z -автоматы, входящие в ИС, влияет <i>один</i> из факторов, <i>ускоряющих</i> развитие градостроительной системы, |
| THEN | единичный z -автомат ОС-модели будет иметь <i>быструю</i> скорость урбанизации территории. |

ВЛФП 2:

IF единичный z-автомат ОС-модели имеет *умеренную*
 скорость урбанизации,
AND на z-автоматы, входящие в ШС, влияет *более одного*
 из факторов, *ускоряющих* развитие градостроительной
 системы,
THEN единичный z-автомат ОС-модели будет иметь
 очень быструю скорость урбанизации территории.

ВЛФП 3:

IF единичный z-автомат ОС-модели имеет *умеренную*
 скорость урбанизации,
AND на z-автоматы, входящие в ШС, влияет *один* из факторов,
 замедляющих развитие градостроительной системы,
THEN единичный z-автомат ОС-модели будет иметь
 медленную скорость урбанизации территории.

ВЛФП 4:

IF единичный z-автомат ОС-модели имеет *умеренную*
 скорость урбанизации,
AND на z-автоматы, входящие в ШС, влияет *более одного*
 из факторов, *замедляющих* развитие градостроительной
 системы,
THEN единичный z-автомат ОС-модели будет иметь
 очень медленную скорость урбанизации территории.

ВЛФП 5:

IF единичный z-автомат ОС-модели имеет *умеренную*
 скорость урбанизации,
AND на z-автоматы, входящие в ШС, влияет *один* из факторов,
 замедляющих и *один* из факторов, *ускоряющих*
 развитие градостроительной системы,
THEN единичный z-автомат ОС-модели будет иметь
 умеренную скорость урбанизации территории.

ВЛФП 6:

IF единичный z-автомат ОС-модели *не урбанизированной*
 территории,
AND на z-автоматы, входящие в ШС, влияет *один* из факторов,
 ускоряющих развитие градостроительной системы,
THEN единичный z-автомат ОС-модели будет иметь *медленную*
 скорость урбанизации территории.

Для изменения состояния единичного z -автомата ОС-модели из одного состояния в другое необходимо инициировать процесс развития, скорость которого будет определяться первичными и вторичными локальными функциями перехода, которые и определяют непрерывность процесса развития градостроительной системы.

Необходимо отметить, что факторы ускорения и замедления развития градостроительной системы могут также быть формализованы в терминах нечетких переменных. То есть факторы, ускоряющие или замедляющие процесс развития градостроительной системы, могут быть «сильными», «умеренными», «слабыми» в своем воздействии на процесс урбанизации и на процесс развития градостроительной системы в целом.

Например, учет топографических особенностей территории позволяет реализовать в ОС-модели влияние факторов, которые либо полностью замедляют процесс развития градостроительной системы либо оказывают сдерживающее влияние на рассматриваемый процесс.

Управляемость территориально-пространственной системы может быть обеспечена при условии учета степени влияния любого ускоряющего или сдерживающего фактора на скорость пространственно-временного развития градостроительной системы.

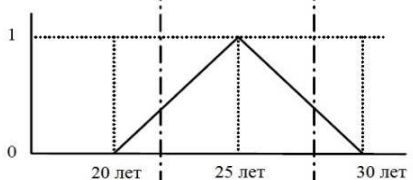
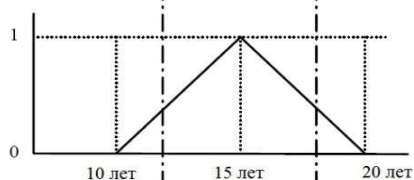
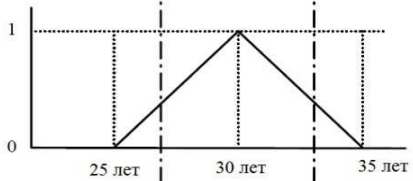
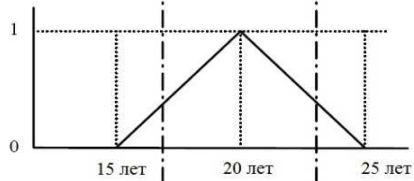
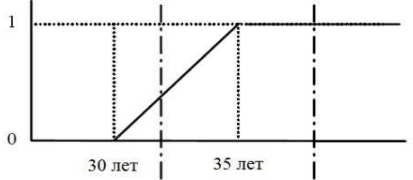
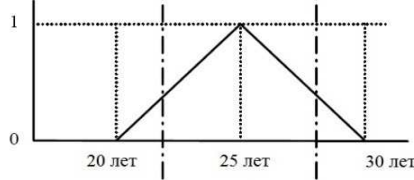
Например, интервал времени развития градостроительной системы от 15 до 25 лет можно отнести к «средней» скорости. Максимальное значение функций принадлежности для «средней» скорости развития градостроительной системы достигнет в момент времени около 20-ти лет. В случае наличия ускоряющих факторов для z -автоматов-соседей, входящих в шаблон соседства (ШС) X , максимальное значение функции принадлежности для «средней» скорости развития градостроительной системы скорость развития градостроительной системы может достигнуть на интервале времени от 10 до 20 лет.

Необходимо отметить, что если воздействуют несколько ускоряющих факторов, то скорость развития градостроительной системы стремится быть ближе к 10 годам, что соответствует нечеткому множеству «быстро».

В таблице 4.3 представлены первичные и вторичные локальные функции переходов, которые определяют порядок и скорость изменения развития градостроительной системы. Вторичные локальные функции перехода характеризуют ограничивающий фактор – уклон рельефа и ускоряющий фактор – плотность улично-дорожной сети.

В итоге можно сказать, что разрабатываемая система прогнозирования пространственно-временного развития градостроительной системы «погружена» в нечеткую среду, находящуюся под воздействием внешних факторов. Основываясь на правилах вывода с нечеткой логикой, можно значительно расширить количество факторов в модели, влияющих на скорость пространственно-временного развития градостроительной системы, в зависимости от понимания градостроительной системы, доступности исходных данных, которые характеризуют факторы, касающиеся градостроительной системы. Эти факторы могут быть или физическими, социально-экономическими, организационными или сочетанием вышеуказанных факторов.

Таблица 4.3

ВЛФП ПЛФП	Фактор , ограничивающий — уклон рельефа			Фактор , ускоряющий — плотность улично- дорожной сети		
	Плоский	Средний	Крутой	Высокая	Средняя	Слабая
ПЛФП 1 (обычный процесс урбанизации)						
ПЛФП 2, ПЛФП 3, ПЛФП 5 (медленный процесс урбанизации)						
ПЛФП 4 или ПЛФП 6 (очень медленный процесс урбанизации)						

4.3.4 Процесс дефазификации

Дефазификация используется тогда, когда необходимо преобразовать нечеткий набор значений выводимых лингвистических переменных к точным значениям. Имеется достаточно большое количество методов перехода к точным значениям (по крайней мере, 30). Наиболее общие методы — «методы полной интерпретации» и «по максимуму». В методе

полной интерпретации точное значение выводимой переменной вычисляется как значение «центра тяжести» функции принадлежности для нечеткого значения. В методе «максимума» в качестве точного значения выводимой переменной принимается максимальное значение функции принадлежности.

Для дефазификации применяется простая линейная функция принадлежности, как показано на рис. 4.15. В соответствии с этой функцией принадлежности состояние каждого единичного z -автомата может быть представлено в трех состояниях: не урбанизированное, частично урбанизированное и урбанизированное состояние территории. Единичные z -автоматы OC -модели, для которых значение функции принадлежности – 0 соответствуют состоянию не урбанизированной территории, единичные z -автоматы, для которых значение функции принадлежности – 1 соответствуют состоянию урбанизированной территории, и все другие z -автоматы, для которых значение функции принадлежности принимает значение от 0 до 1 – полностью относятся к частично урбанизированной территории.

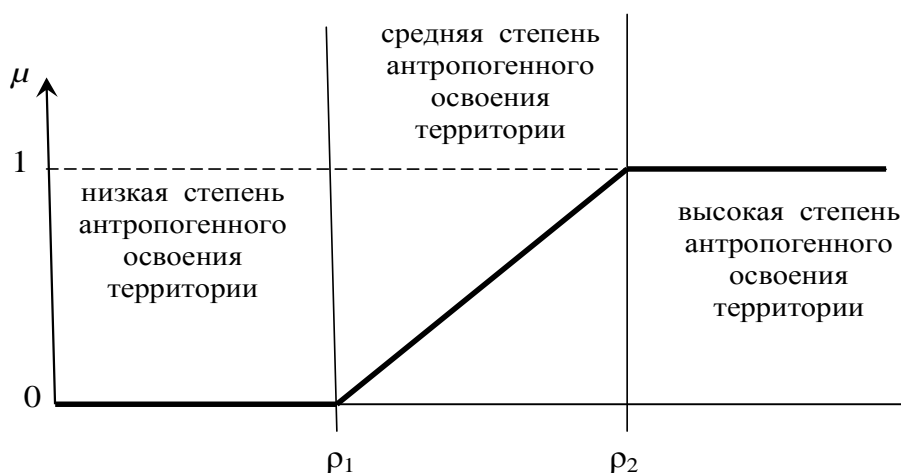


Рис. 4.15 – Функция принадлежности дефазификации нечетких выходных результатов

На рис. 4.16 представлены результаты моделирования развития градостроительной системы не с учетом как ограничивающего фактора топографических особенностей рельефа местности, так и ускоряющего фактора, которым является плотность улично-дорожной сети. В результате моделирования показано, что наиболее быстро подвергаются урбанизации территории, находящиеся вдоль основных транспортных магистралей.

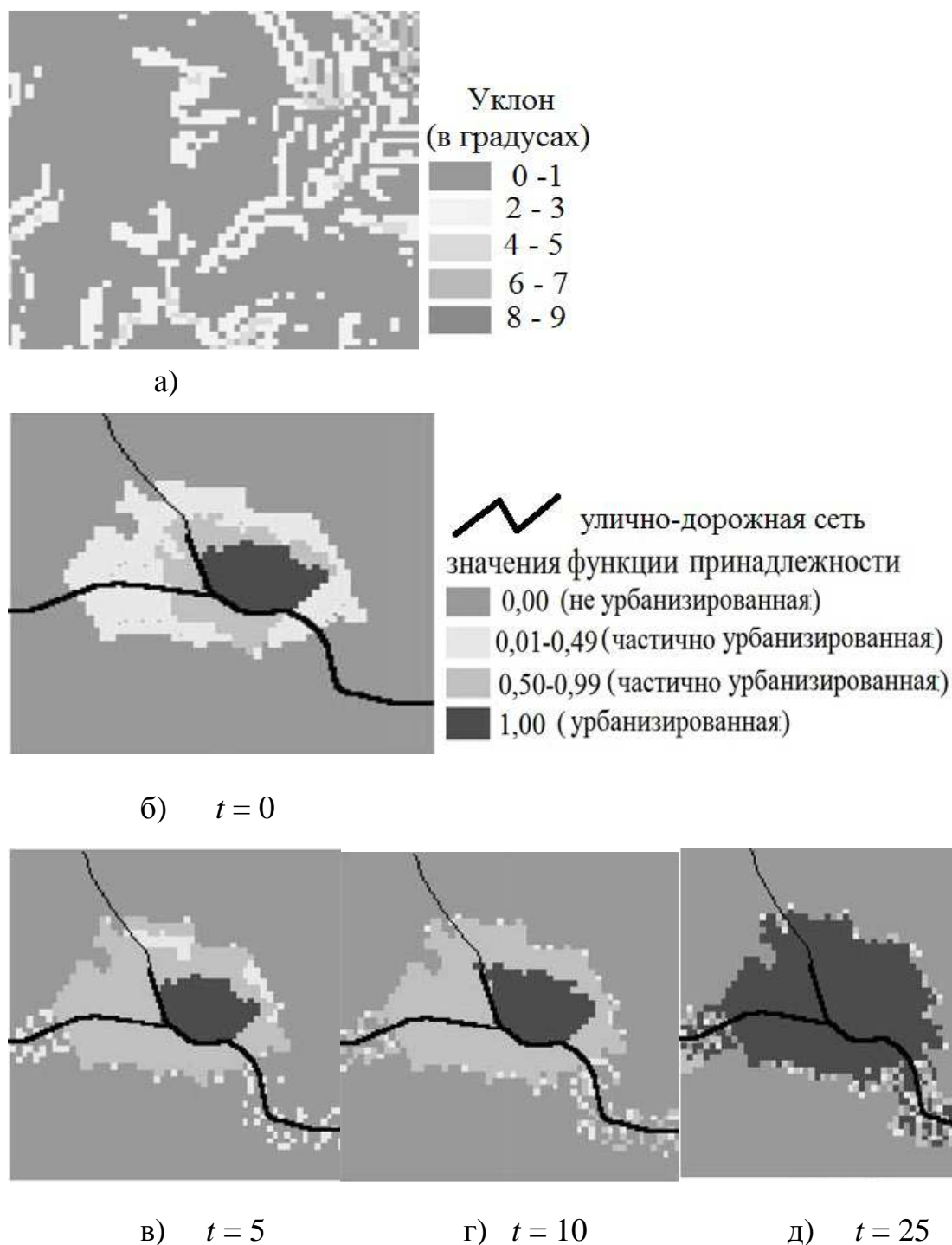


Рис. 4.16 – Влияние ограничивающих и благоприятных факторов на динамику развития градостроительной системы: а) уклон рельефа; б) начальное состояние градостроительной системы; в) сценарий развития на 5 лет; г) сценарий развития на 10 лет; д) перспективы развития градостроительной системы на 25 лет

Выводы

В главе разработана концепция модели пространственно-временного развития градостроительной системы на основе принципов нечетких однородных структур и нечеткой логики. Одной из таких функций модели является определение состояний единичного z -автомата. На основе теории нечетких множеств состояние единичного z -автомата связано со степенью принадлежности различных состояний единичного z -автомата в процессе городского развития. Применение теории нечетких множеств позволяет представить развитие градостроительной системы как непрерывный процесс в пространстве и времени, а не в виде бинарного перехода между не урбанизированной и урбанизированной территориями.

Кроме того, используя продукционную модель представления знаний, сформулированы локальные функции перехода для регулирования скорости изменения состояния единичных z -автоматов из одного состояния в другое, используя такие лингвистические переменные: как «быстро», «очень быстро», «средний», «медленно», «очень медленно» и так далее.

Факторы, влияющие на скорость пространственно-временного развития градостроительной системы, могут быть применены в модели как ограничивающие или ускоряющие процесс. Эти факторы могут отображать физические особенности окружающей среды, архитектурно-планировочные особенности, социально-экономические условия, а также многие другие. Такие факторы применяют в модели пространственно-временного развития градостроительных систем как вторичные логические правила. Применение нечеткой логики в формировании локальных функций перехода для правил предполагает совершенно иной уровень моделирования, благодаря которому творческий процесс моделирования происходит на наивысшем уровне абстракции, при котором постулируется лишь минимальный набор закономерностей.

5. ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ПЛАНИРОВОЧНЫХ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Учитывая различную профессиональную подготовку муниципальных служащих, в недрах городских администраций рождаются все новые и новые программные документы. Во многом процесс городского планирования похож на ритуальный танец индейцев по призыванию дождя – может, он и не имеет никакого отношения к дождю, но участникам танца представляется, что имеет.

Акофф Рассел Л. – американский ученый, один из основателей системного анализа, кибернетик, экономист и философ.

Ключ к устойчивому развитию территорий лежит в оптимальном использовании и организации жизненного пространства. Инструментом, способствующим оптимальной организации территории, является пространственное планирование. Пространственное планирование, к которому относятся схемы территориального планирования разных территорий, Генеральные планы поселений являются формализованным представлением специалистов и проектировщиков об оптимальной пространственной организации территории. Это представление основано на всестороннем научном изучении естественного и социального факторов: экономико-географического положения территории (города), природных, промышленных, демографических ресурсов, агропромышленного и лесного комплексов, экологического состояния.

Те негативные проблемы, с которыми мы сталкиваемся в повседневной жизни: загрязненность источников питьевой воды, размещение вредных производств в центре города и, как следствие, обитание большей части населения в санитарно-защитных зонах предприятий, размещение взрывчатых и других опасных веществ в непосредственной близости к селитебным зонам, бездарное и хищническое уничтожение рекреационных зон, ошибки в ходе управления городской системой, затопление огромных территорий плодородных земель и т.п. все

это наследство, которое досталось от неоптимальных, с точки зрения современной науки, и конъюнктурных решений.

Важнейший этап в развитии территорий – это территориальное планирование, которое уже не обходится без геоинформационных систем (ГИС), которые обеспечивают возможность постоянной актуализации пространственных данных, научную обоснованность предложений и решений, основанных на накопленных и наглядно представленных данных, возможность моделирования разных сценариев, использования созданных в ГИС материалов для градостроительного и экологического мониторинга.

Потребность более эффективно решать задачи управления, планирования, инвентаризации и эксплуатации инженерных коммуникаций также приводит к необходимости внедрения геоинформационных технологий как в муниципальных образованиях, так и на больших предприятиях.

5.1 Модель поиска пригодной территории для размещения промышленного предприятия в пределах городской границы

5.1.1 Разработка концептуальной модели поиска пригодной территории на основе применения геоинформационных технологий

Рассмотрим один из возможных подходов к построению модели поиска пригодной территории (ППТ) для размещения промышленного предприятия. Модель ППТ базируется на использовании возможностей геоинформационных систем. Такой подход определяет три уровня оценки пригодной территории, связанные с географическим масштабом, в котором выполняется пространственный анализ.

Первый уровень оценки связан с определением региона или группы областей исследуемой предметной области для идентификации потенциальных зон размещения промышленного предприятия.

На втором уровне оценки определяется пригодность территории для размещения предприятия с учетом требований, определяемых местными органами власти.

На третьем уровне рассматриваются проблемы потенциальных зон размещения промышленного предприятия с учетом характеристик конкретной территории.

Предлагаемый подход и разработанный инструментарий обеспечит повышение качества принятия решений на уровне муниципального и

регионального планирования. С использованием многокритериального подхода территориальная пригодность для размещения промышленного предприятия может быть представлена в виде картографических материалов.

Размещение промышленных предприятий - это ключевой вопрос в региональном планировании, так как оказывает влияние на экономическое, социальное развитие и воздействует на окружающую среду, что является решающим фактором при выборе территории.

Пригодное местоположение промышленного предприятия должно удовлетворять широкому диапазону факторов, чтобы сбалансировать социально-экологическое преимущество и экологическую устойчивость региона.

Транспортная доступность, наличие инфраструктуры, ее развитость, наличие трудового ресурса, близость к рынкам сбыта и сырьевым источникам и раньше, и в настоящее время являются главными факторами при выборе территориального размещения производства.

Однако устойчивое развитие требует нового подхода. Чтобы определить возможные зоны местонахождения промышленного производства необходимо учитывать негативное воздействие, создаваемое при строительстве и эксплуатации предприятия.

Концептуальная модель поиска пригодной территории представлена на рис. 5.1 и состоит из трех основных этапов, которые связаны с географическим масштабом поиска пригодной территории.

На первом этапе рассматривается задача пригодности на региональном уровне, чтобы определить и идентифицировать те потенциальные области, которые имеют высокую способность к индустриальному развитию.

На втором этапе рассматриваются факторы, которые влияют на принятие решения по выбору пригодной территории на муниципальном уровне. Наконец, на третьем этапе определяются аспекты, которые имеют отношение к существующим индустриальным районам и областям, которые рассматриваются как возможные для размещения промышленных предприятий.

Реализация модели поиска пригодной территории выполнена на базе геоинформационной системы ArcGIS 9.1. Программные средства ArcGIS 9.1 обеспечивают пространственные аналитические функции,

которые позволяют создавать графические модели обработки геоданных в интерактивном режиме, включая картографические наборы данных.

Нечеткие функции используются для вычисления атрибутов (характеристик), связанных с векторными наборами данных, отображаемыми на картах. Нечеткие правила в основном предполагают использование линейных, треугольных и трапецевидных функций принадлежности.

Результатом применения модели ППТ является построение ряда тематических карт, которые могут оказать помощь лицам принимающим решения в выборе того или иного решения при размещении промышленного предприятия на территории.

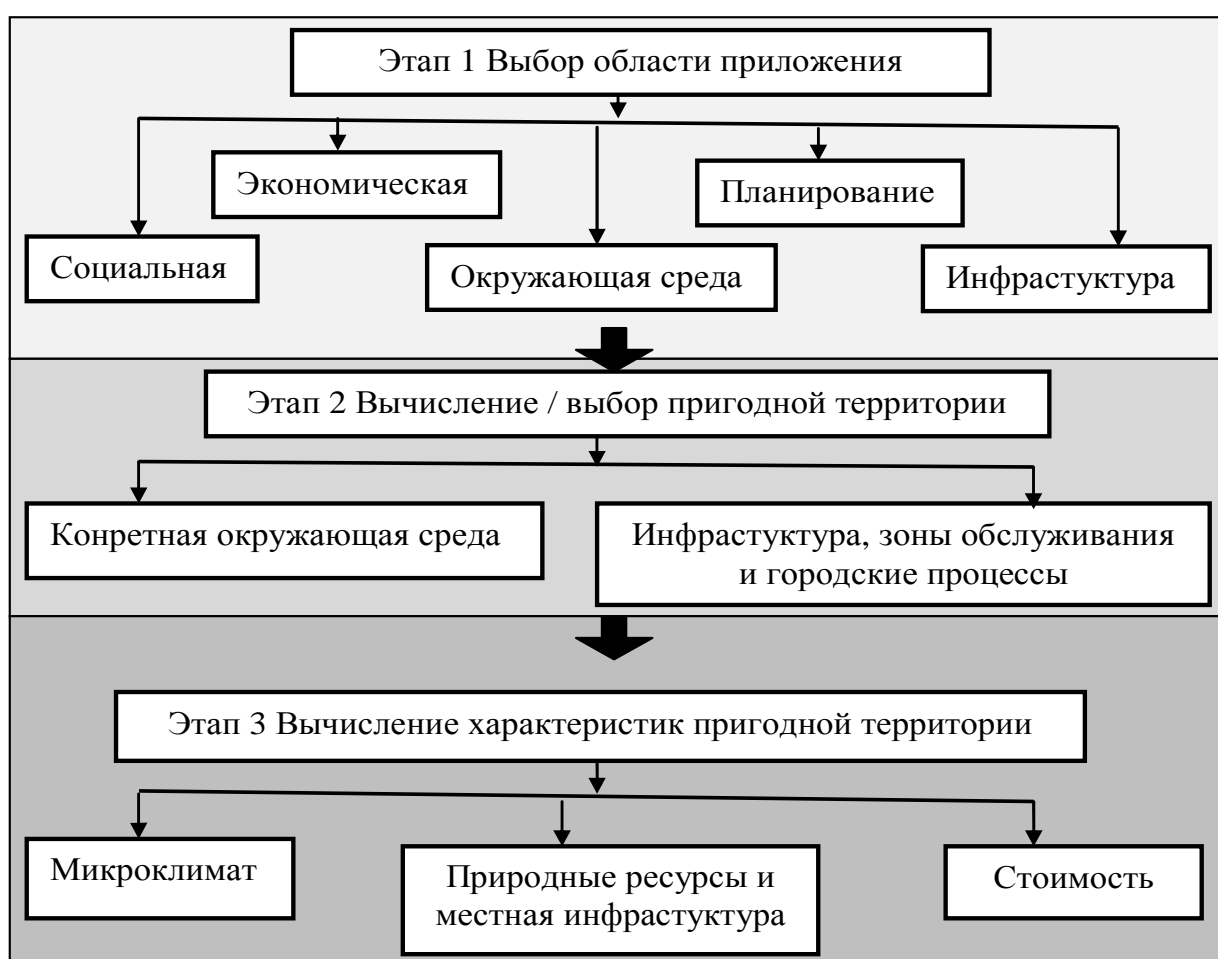


Рис. 5.1 – Концептуальная модель поиска пригодной территории

В настоящее время уделяется много внимания применению нечетких множеств для решения аналитических задач с использованием геоинформационных систем. Нарастающие информационные потоки в современном обществе, разнообразие информационных технологий,

повышение сложности решаемых пространственных задач увеличивают нагрузку на лицо, принимающее решение (ЛПР), и ставят задачу переноса проблемы выбора и принятия решений с человека на современные информационные технологии. Одним из путей решения этой задачи является применение аналитических систем, которые могут быть составной частью геоинформационных систем. Пространственные системы, основанные на нечетких множествах, в том числе и ГИС, позволяют ЛПР:

- объединять знания о конкретной предметной области и опыт экспертов в виде лингвистических переменных и использовать их на этапе пространственного анализа;
- управлять неопределенностью в системах поддержки принятия решений;
- формализовать нечетко сформулированные проблемы в задачах принятия решений.

Обобщенная схема методологического подхода для реализации модели поиска пригодной территории с использованием геоинформационных технологий показана на рис. 5.2.

5.12 Моделирование неопределенности средствами геоинформационных технологий

Рассмотрим в качестве примера задачу размещения гипотетического промышленного предприятия в пределах городской границы. Критерий для размещения предприятия можно сформулировать в виде лингвистической переменной:

«Если месторасположение равнинное

и имеет небольшой уклон

и размещено недалеко от дороги,

и недалеко от городской границы,

То данная территория пригодна для размещения промышленного предприятия».

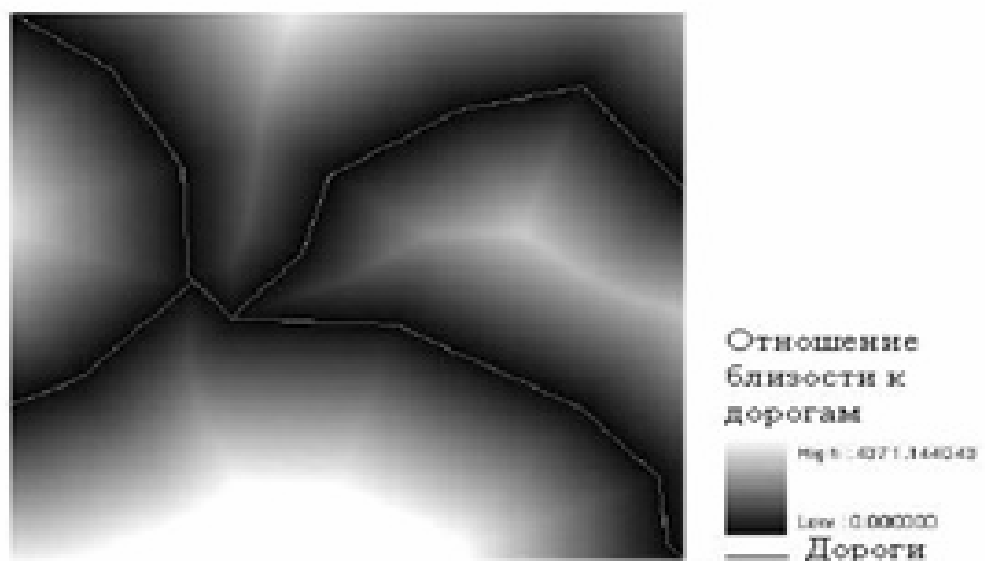
Для принятия решения, основанного на этой нечеткой формулировке человеку нужно немного времени. Однако получить ответ на такой нечеткий вопрос средствами ГИС невозможно. В терминах логических переменных запрос на размещение предприятия в городской черте можно сформулировать достаточно точно:

территория пригодна, если $(\text{уклон} \leq 20 \%) \&$

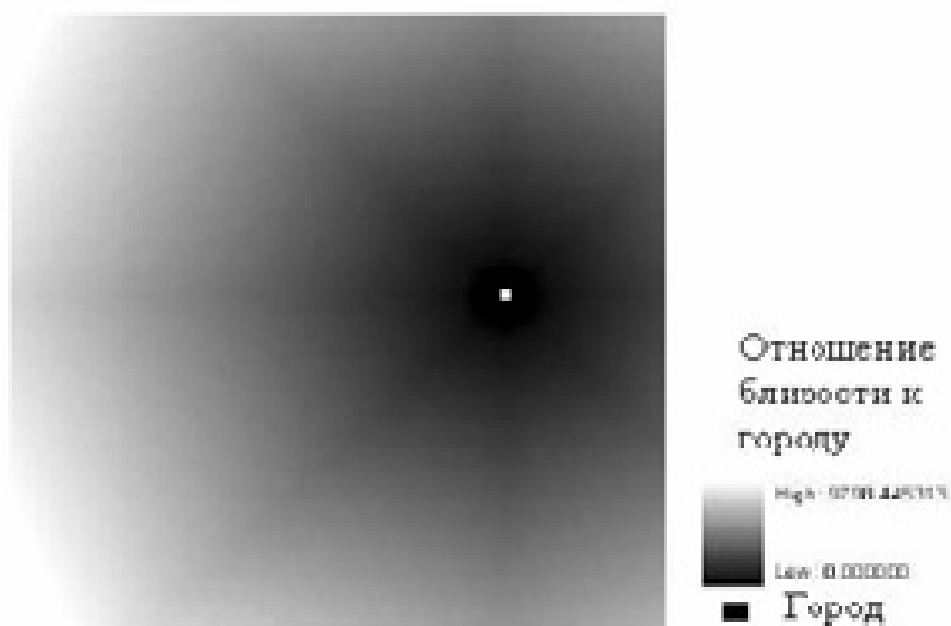
$\& (\text{удаление от дорог} \leq 1000 \text{ м})$

$\& (\text{удаление от городской границы} \leq 5000 \text{ м}).$

На рис. 5.3 (a), (b) показаны растры отношения близости к дорогам и отношения близости к городу. Все исходные данные получены средствами применения геоинформационных технологий.



(a)



(b)

Рис. 5.2 – (a) отношение близости к дорогам, (b) отношение близости к городу



Рис. 5.3 – Методологический подход для реализации модели поиска пригодной территории

Для получения ответа на запрос о расположении гипотетического промышленного предприятия необходимо выполнить оверлейные операции с логическим оператором AND (&) над тремя исходными растрами. Результат выполнения запроса представлен на рис. 5.4 (а).

С использованием нечетких множеств запрос для поиска подходящей территории можно сформулировать в следующем виде:

ЕСЛИ (уклон незначительный)

OR (уклон умеренный)

AND (расстояние близко к дороге)

AND (расстояние близко к городской черте)

ТО территория пригодна для размещения промышленного предприятия.

Для решения данного запроса с нечеткими логическими переменными построены соответствующие функции принадлежности для каждого критерия, которые участвуют в нечетко сформулированном запросе (рис. 5.5 а, b, c, d).

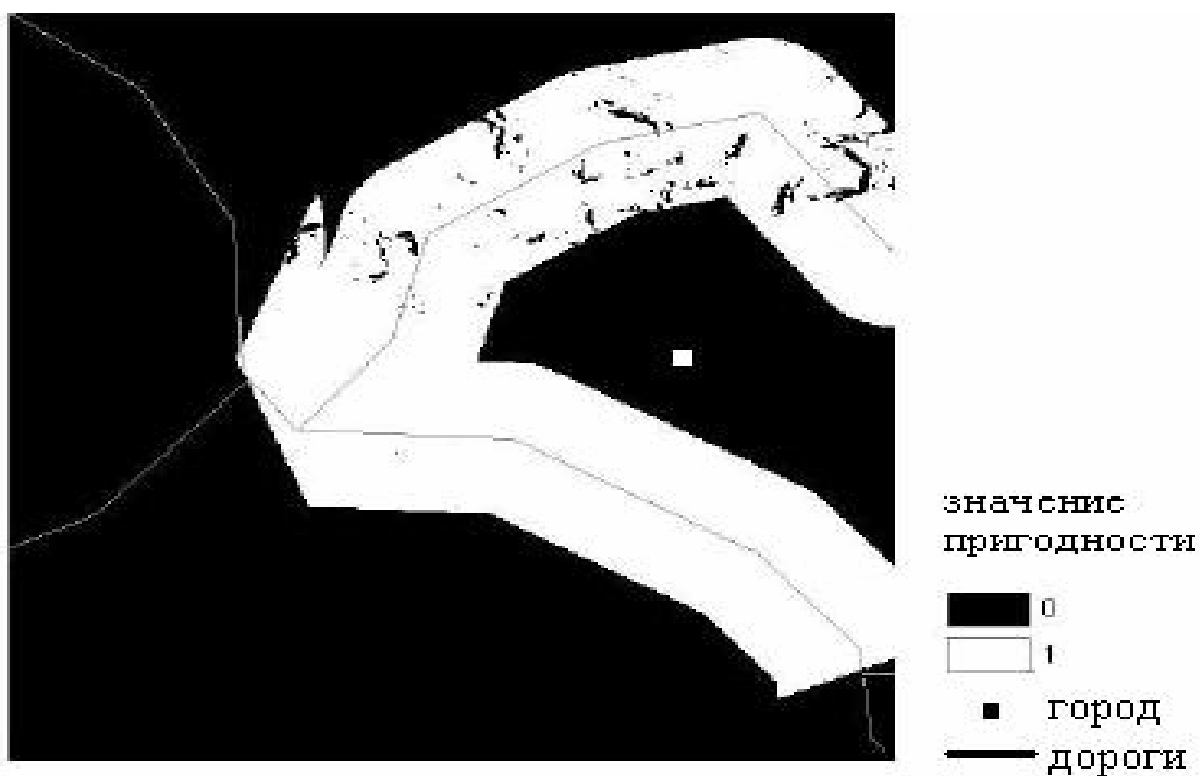
Результат выполнения запроса, построенного с использованием нечетких множеств показан на рис. 5.4 (b).

При традиционном подходе к принятию решения лицо принимающее решение (ЛПР) не имеет возможности выбора худшего или лучшего варианта для размещения предприятия так как результат логического анализа принимает значения 1 или 0, что характеризует, подходит месторасположение или нет.

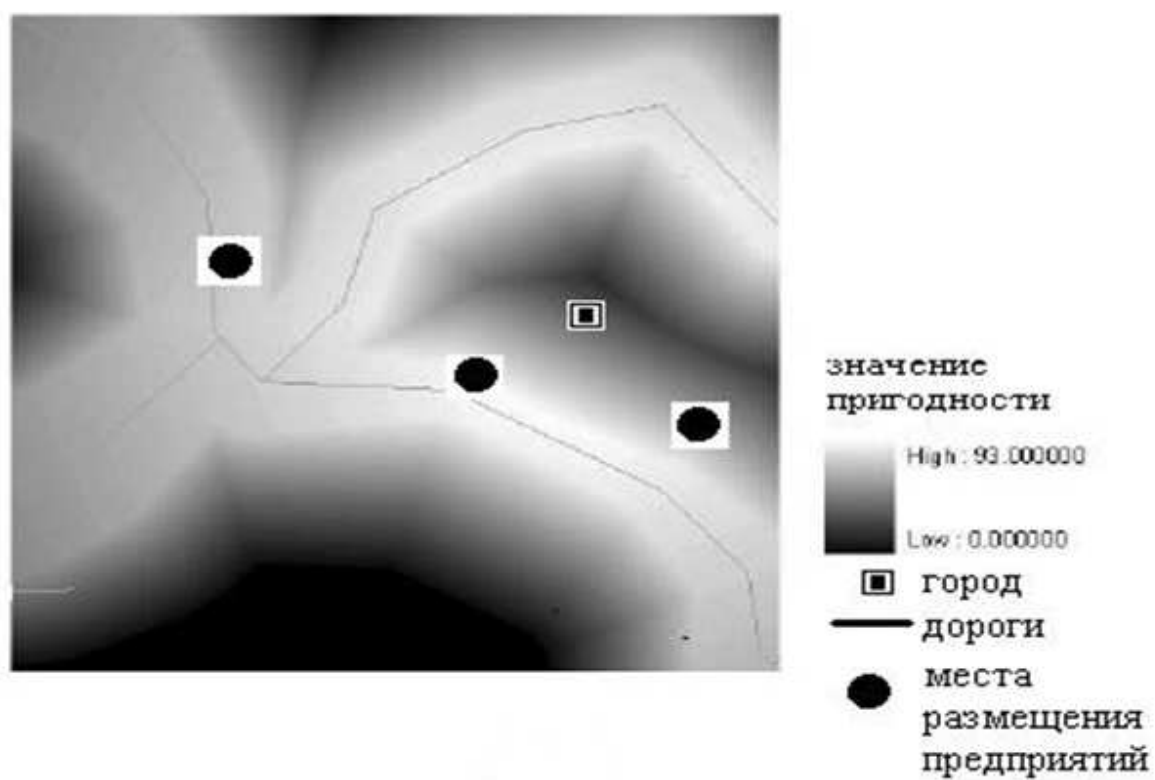
Запрос, построенный на основе нечетких множеств обеспечивает ЛПР информацией с высокой точностью, так как каждое местоположение предприятия имеет степень пригодности (табл. 5.1).

Таблица содержит результаты, характеризующие пригодность территории для размещения предприятия. Необходимо отметить, что А, В, С характеризуют размещение, подходящее с точки логического анализа.

Результат, основанный на нечетких множествах, обеспечивает ЛПР более подробной информацией для принятия решения. Таким образом, территория, которая наиболее удовлетворяет требованию (2) соответствует месторасположение С (таблица 5.1).

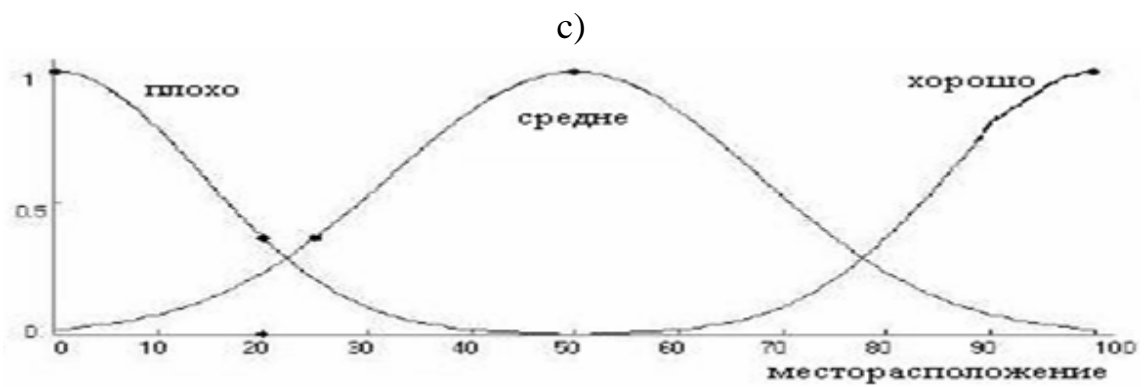
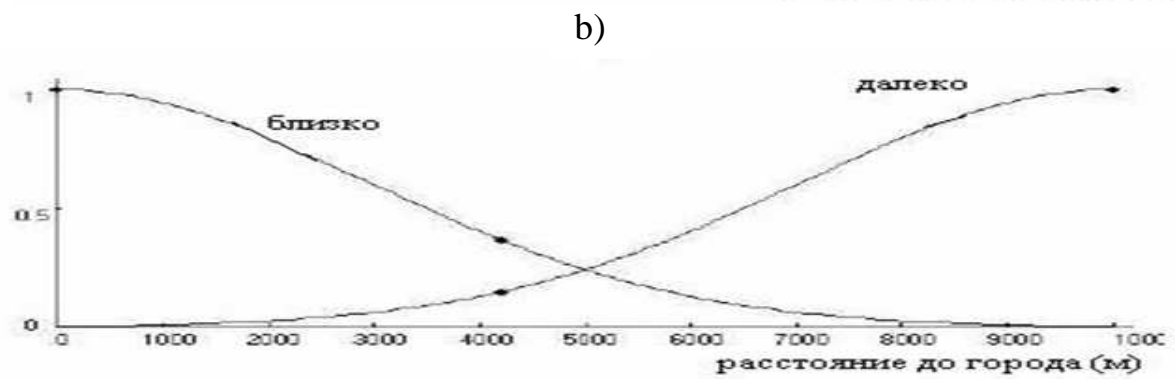
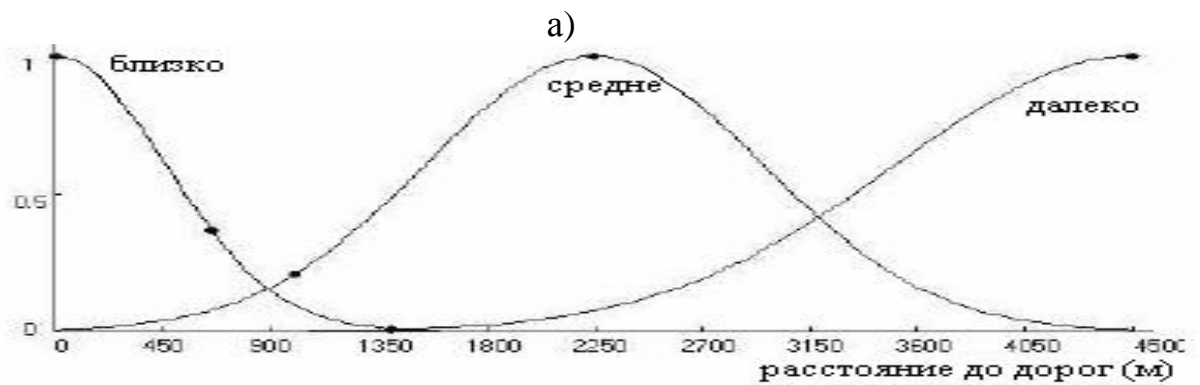
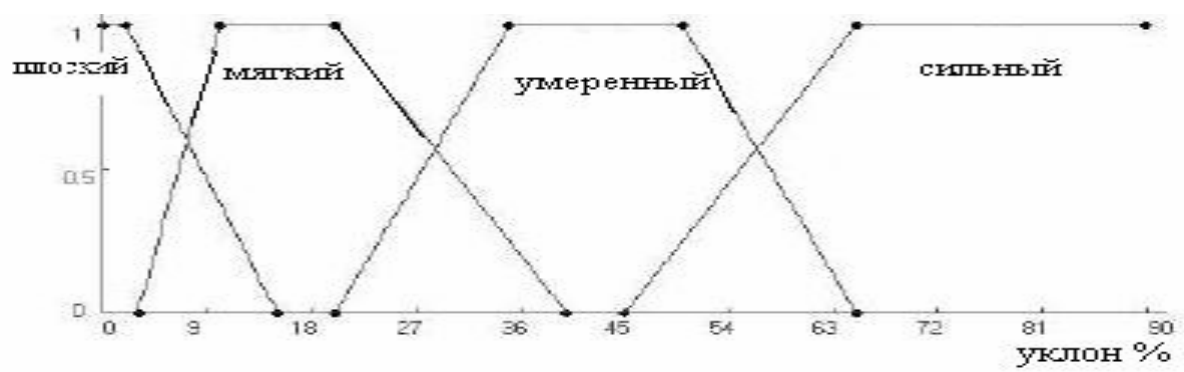


(a)



(b)

Рис. 5.4 – а) результат логического анализа для поиска месторасположения предприятия, б) тот же результат с применением нечетких множеств



d)

Рис. 5.5 – Функции принадлежности а) «мягкого уклона»,
 б) «близко к дорогам», с) «близко к городу»,
 д) «месторасположение предприятия»

Таблица 5. 1

Месторасположение	Уклон (%)	Расстояние до дорог (м)	Расстояние до города (м)	Результат, основанный на логических вычислениях	Результат, основанный на нечетких вычислениях
А	3.0	300	4953.1	1	77
В	1.4	995.7	2352.4	0	70
С	1.1	50	2197.3	1	90

Данный подход, реализующий рассмотренный нечеткомножественный подход к реализации модели поиска пригодной территории, реализован в виде программного модуля в геоинформационной среде ArcGIS 9.1. Применение нечеткой логики при обработке пространственной информации позволяет избежать потери информации, которая возникает, если данные обрабатываются с использованием обычных методов классификации.

Таким образом, можно сказать, что классическая теория множеств, которая обычно используется при решении пространственно-планировочных задач развития городских территорий, фиксирует задаваемую точность для информации, которая по своей сути является неопределенной. Нечеткая логика позволяет определить пути формализации неопределенности реального мира. Задачи принятия решений, построенные на нечеткой логике позволяют принимать решения, используя знания и опыт экспертов в конкретной предметной области, учитывая ее особенности.

5.2 Современная практика размещения новых градостроительных объектов на сложившейся территории

В настоящее время наблюдается значительное усложнение задач принятия пространственно-планировочных решений (ППР), связанных с освоением городских территорий, возникла насущная необходимость привлечения новых математических методов, внедрения геоинформационных технологий в процесс управления территориальным развитием городов.

Современная практика размещения новых градостроительных объектов на городской, уже сложившейся территории, а тем более по своей природе техногенных объектов, которыми являются автозаправочные станции, приводит к негативным изменениям инженерно-геологических характеристик территорий. При этом, как правило, игнорируются возможности изменения параметров природной среды под влиянием новой застройки, игнорируется благоустройство городской территории в целом.

Выполнение прогноза и принятие ППР на застройку территорий на практике связано со значительными трудностями, которые обусловлены большой трудоемкостью расчетов по проверке антропогенных влияний, которые возникают в результате размещения техногенно-опасного объекта.

В Государственных строительных нормах Украины сформулирована достаточно стройная система территориального планирования, которая должна стать основой, как для прогнозирования, так и принятия ППР на развитие городской территории. Однако проблема раскрытия инвестиционного потенциала территории сравнительно мало (или недостаточно) раскрыта на микроуровне: точечный объект, участок под застройку, размещение техногенно-опасных объектов в городской черте, пространственная зона в правилах землепользования и застройки. Для рассмотрения территории на микроуровне используются такие инструменты как бизнес-план, паспорт площадки под застройку, оценка стоимости недвижимости, обычно слабо связаны с особенностями пространственно-планировочных решений. В целом на микроуровне процесс принятия ППР по выбору места размещения новых градостроительных объектов в настоящее время представляется не до конца формализованным и не достаточно открытым.

Для принятия ППР по размещению новых градостроительных объектов, особенно техногенно-опасных, требует наличие полной информации, что не всегда является возможным. Одним из направлений для решения задач градостроительного проектирования в настоящее время является применение аналитических систем, основанных на нечеткой логике.

Функционирование нечетких систем основано на использовании лингвистических переменных, что позволяет формализовать нечетко сформулированные задачи по размещению новых объектов, особенно в условиях застроенных территорий.

Нечеткость при принятии решений по застройке городских территорий возникает в случае, когда необходимо количественно охарактеризовать качественные понятия и отношения между объектами уже сложившейся градостроительной системы. В данном случае эксперты часто не могут оперировать четкими понятиями, а используют нечеткие переменные, которые подсознательно понимают, но выразить количественно затрудняются. В нечеткой логике точные значения переменных преобразуются в значения лингвистических переменных посредством применения теории нечетких множеств. Значения любой величины представляются не числами, а словами естественного языка – термами.

Принадлежность каждого точного значения одному из термов лингвистической переменной определяется функцией принадлежности.

Необходимо отметить, что нечеткость проявляется в процессе пространственно-планировочных решениях:

- в процессе описания постановки задачи и целей классификации;
- при выборе системы показателей, характеризующих постановку задачи;
- при выборе алгоритмов классификации;
- при подборе способов представления конечного результата.

Применение понятия нечеткого множества открывает широкий подход к анализу и решению пространственных задач, в том числе задач принятия пространственно-планировочных решений по управлению городскими территориями.

5.2.1 Пространственно-планировочное решение по размещению АЗС на сложившейся территории (на примере Коминтерновского административного района города Харькова)

В качестве примера рассмотрим одну из возможных постановок задачи пространственно-планировочного решения по размещению техногенно-опасного объекта на территории Коминтерновского административного района города Харькова. В качестве техногенно-опасного объекта рассматривается автозаправочная станция (АЗС).

Реализация моделей для решения задач пространственно-планировочного решения связана, как правило, с созданием сложных многофакторных структур, которые учитывают:

- пространственную неоднородность объектов, которые находятся на городской территории;
- вес или значимость каждого фактора;
- пространственные взаимосвязи между объектами, которые участвуют в пространственно-планировочном решении.

В настоящее время одним из самых простых вариантов для принятия ППР применяется моделирование ситуации средствами пространственного анализа ГИС, то есть выполняются простые операции геометрического наложения данных различных тематических слоев. При этом имеющиеся объекты тематических слоев могут рассматриваться как исключающие факторы. Проводится четкая классификация наборов данных, используется весь арсенал логических и математических операторов, весовые коэффициенты, которые показывают степень пригодности каждого из исключающих факторов.

Целесообразность применения классификаций с использованием методов теории нечетких множеств для принятия ППР предполагает возможность относить территориальные объекты не просто к одному из классов (как в стандартных алгоритмах многомерных классификаций), а одновременно к нескольким классам с различными функциями принадлежности. Такая классификация удобна, когда в действительности границы между классами имеют нечеткий, переходный характер, что должно учитываться при математическом моделировании и соответствующим образом отражаться в тематических слоях ГИС.

Согласно Государственным строительным нормам Украины основным фактором, который ограничивает принятие ППР по размещению АЗС, является расстояние к объектам городской инфраструктуры. Наименование объекта, до которого устанавливается ограничение на размещение АЗС, и минимальное расстояние до объекта показано в таблице 5.2.

Для принятия ППР по размещению АЗС на территории Коминтерновского административного района города Харькова разработана база данных в среде ArcGIS 9.3, которая содержит тематические слои, созданные в соответствии с таблицей 5.2.

На рис. 5.6 а), б), в), г) показано содержание тематических слоев, которые являются исходными данными для принятия ППР решения по размещению АЗС на территории Коминтерновского административного района. На основе входных данных с помощью функциональных средств Spatial Analyst построены карты, отображающие степень пригодности городской территории относительно соответствующих объектов.

Растровые наборы данных, полученные в результате применения функций Spatial Analyst, используются для вычисления следующих расстояний:

- от основных магистралей Коминтерновского района;
- относительно зданий и сооружений;
- от рекреационных зон;
- от остановок пассажирского городского транспорта;
- от уже имеющихся АЗС.

Примеры растровых наборов данных, которые моделируют требования, предъявляемые к размещению АЗС на городской территории, показано на рис. 5.6 а), б), в).

Таблица 5.2

Наименование объекта, до которого устанавливается расстояние от сооружений АЗС	Минимальное расстояние, м.
Жилые и общественные здания	25
Места массового скопления людей (остановки общественного транспорта, границы территории рынка)	30
Отдельные торговые палатки и киоски	20
Индивидуальные гаражи и открытые стоянки для автомобилей	18
Очистные канализационные сооружения, которые не относятся к АЗС	15
Производственные, административные и хозяйственные строения, складские помещения и здания промышленных предприятий	12
Склады лесных материалов, торфа, горючих веществ и др.	20
Лесные массивы, парки, городские скверы	25
Пересечение с магистралью	100
Пересечение с улицей местного значения	35

В общем случае принятие ППР заключается в генерации возможных альтернатив решений $\{A\}$, их оценке и выборе лучшего, «правильного ППР» A^* . В результате оценки из исходного множества $\{A\}$ выделяют подмножество альтернатив, которые допустимы по качеству $\{A^{don}\}$.

Для использования в моделях пространственно-планировочных решений информации, которая представлена на основе теории нечетких множеств, необходимо определить вид функций принадлежности. Выбор или построение соответствующих функций принадлежности является важным компонентом в принятии ППР.

Для идентификации различных условий для выбора пригодной для размещения АЗС земельного участка на городской и уже застроенной территории определены лингвистические переменные (ЛП) для всех требований, которые установлены Государственными строительными нормами Украины.

Лингвистическую переменную будем определять кортежем:

$$\langle \beta; T; U; G; M \rangle,$$

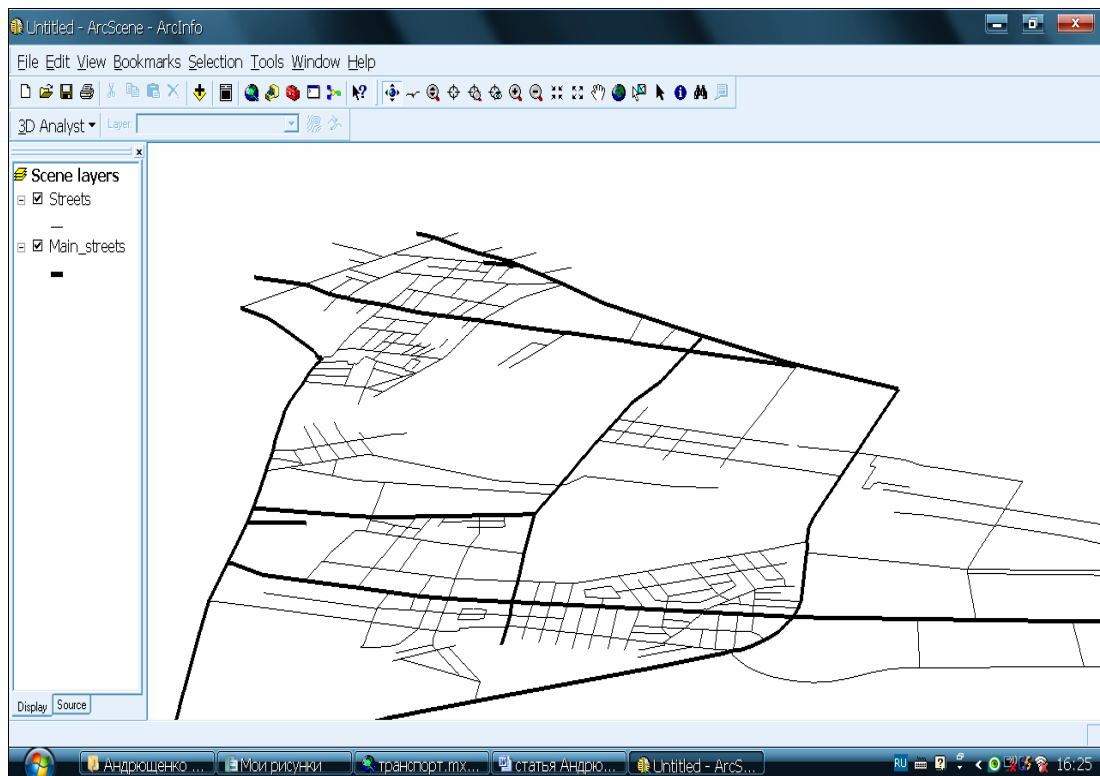
где β – имя лингвистической переменной;

T – множество термов, которые представляют наименования нечетких переменных;

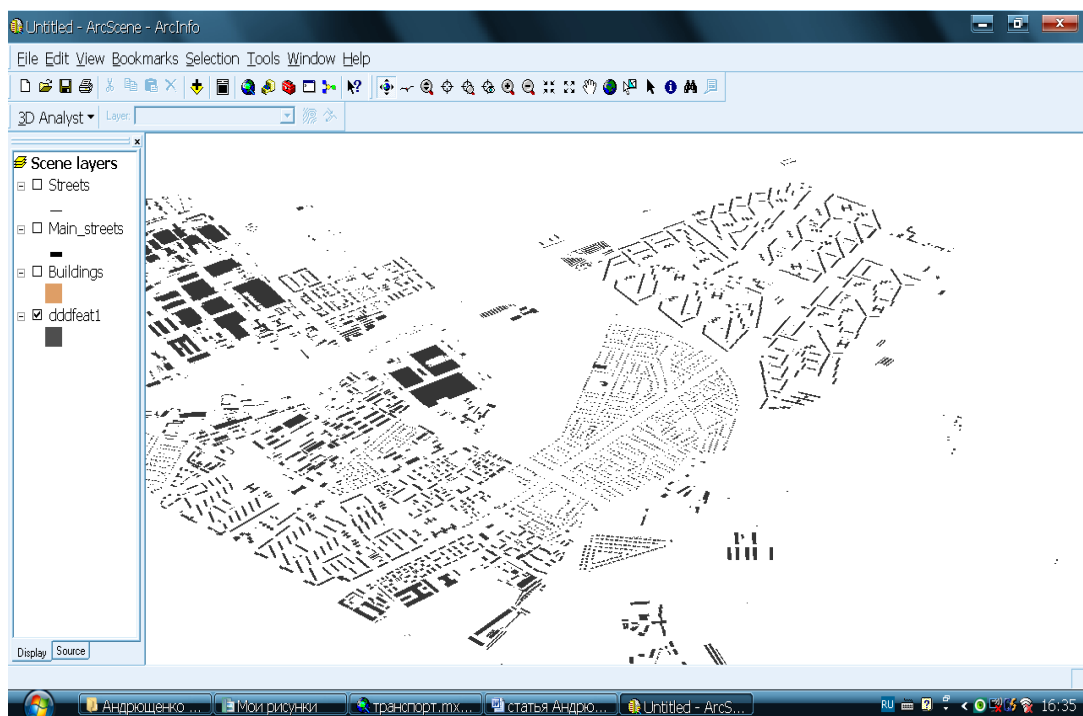
U – область определения каждой из нечетких переменных;

G – синтаксическая процедура, которая характеризует процесс образования из множества T новых, значений лингвистической переменной;

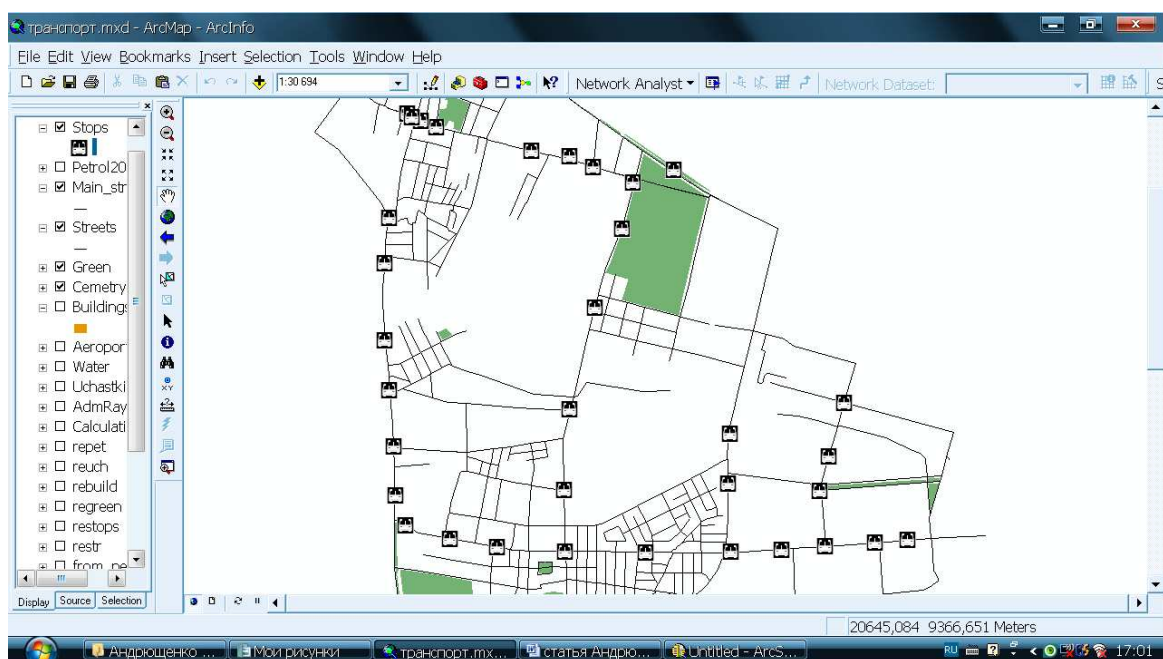
M – семантическая процедура, которая присваивает новому значению, образуемому процедурой G , некоторую семантику путем формирования соответствующего нечеткого множества, т. е. отображает новое значение в нечеткую переменную.



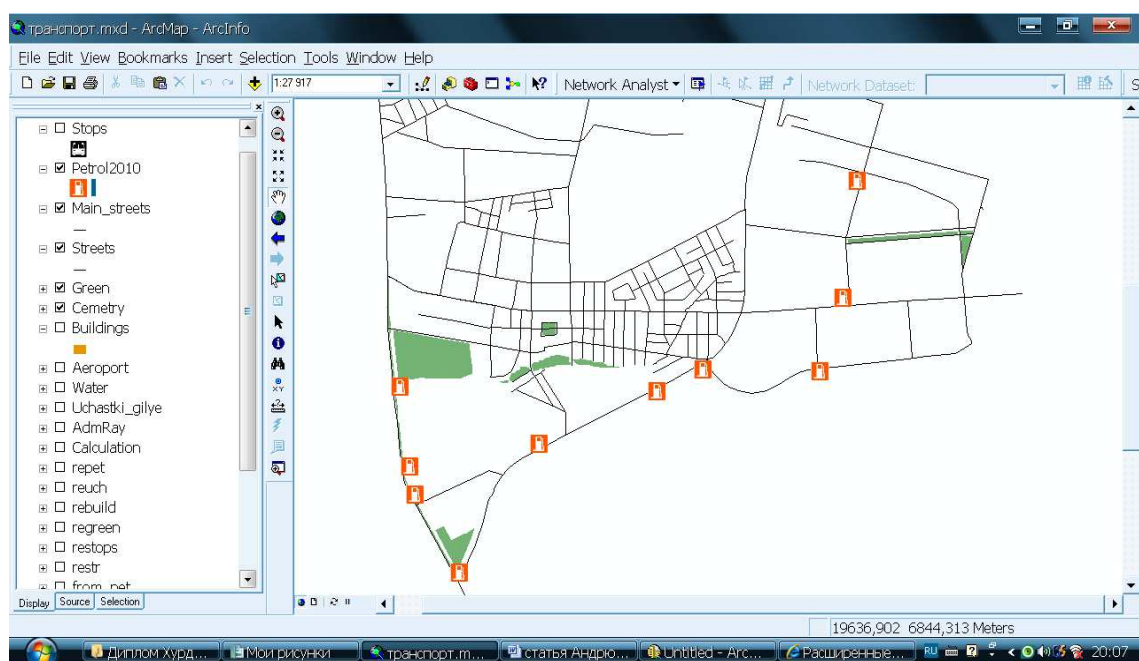
a)



б)



В)



г)

Рис. 5.6 – Тематические слои базы геоданных: а) магистрали и улицы местного значения, б) жилые и общественные здания, в) существующие АЗС, г) места массового скопления людей (остановки общественного транспорта)

В общем случае базовое терм-множество рассматриваемых лингвистических переменных имеет вид

$$T_i = \{T_1^i, T_2^i, \dots, T_m^i\}, \quad (i \in K = \{1, 2, \dots, l\}),$$

где T_i – нечеткая переменная, соответствующая терму $T_i \in T$.

Обозначим нечеткое множество для каждой лингвистической переменной

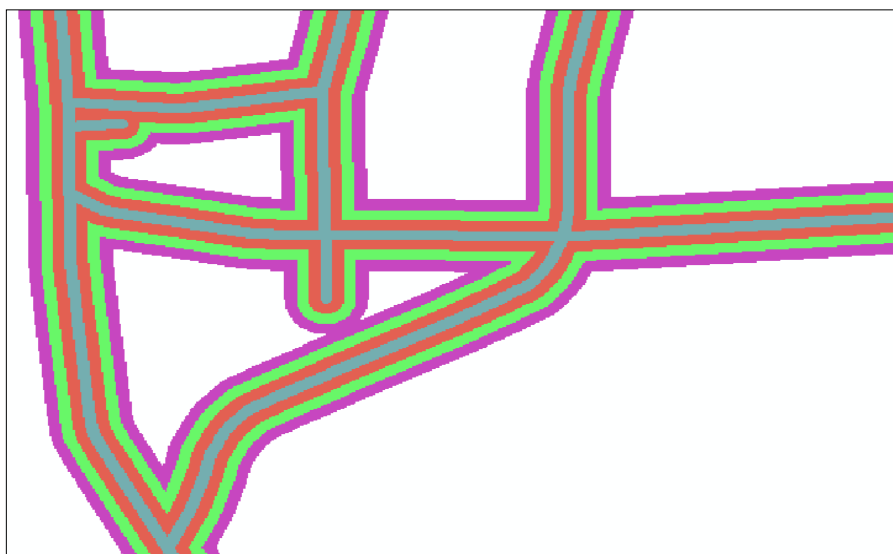
$$A_i = \{\langle \mu_{A_i}(x) / x \rangle\} \quad (x \in X),$$

где $\mu_{A_i}(x)$ – функция принадлежности;

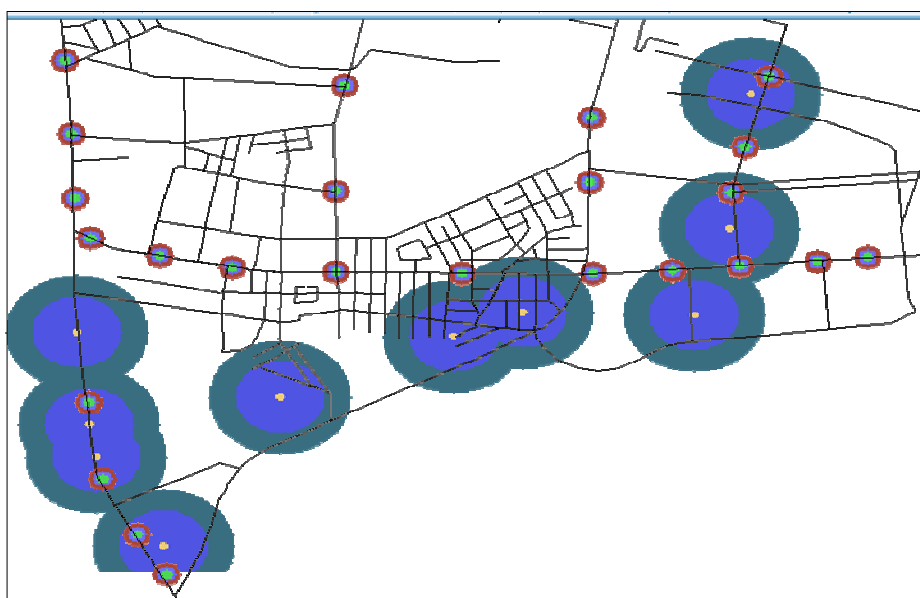
X – базовое множество, в нашем случае определяется требованиями Государственных строительных норм Украины.



a)



б)



в)

Рис. 5.7 – Требования к расстояниям, установленные в соответствии с Государственными строительными нормами Украины, в виде растровых наборов данных: а) жилые и общественные здания, б) магистрали и улицы местного значения, в) остановки общественного транспорта и существующие АЗС

Базовое терм-множество образуется на основе экспертных рассуждений и может быть получено реализацией G -процедуры с применением модификатора m (m соответствуют такие слова, как ОЧЕНЬ, БОЛЕЕ ИЛИ МЕНЕЕ, НЕЗНАЧИТЕЛЬНЫЙ, СРЕДНИЙ и др.).

Например, для лингвистической переменной «Расстояние от магистралей и улиц местного значения» базовое терм-множество есть $T_x = \{\alpha_{x1}; \alpha_{x2}; \alpha_{x3}; \alpha_{x4}\} = \{\text{близко; недалеко; далеко; очень далеко}\}$.

Анализ литературных источников [12, 17, 22, 26] и собственные исследования позволили выявить и описать требования Государственных строительных норм Украины к размещению таких техногенно-опасных объектов как АЗС в виде лингвистических переменных. Функции принадлежности термов лингвистических переменных аппроксимируются типовыми функциями вида (5.1) – (5.3):

$$\mu(x, a, b) = \begin{cases} 1, x \leq a \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{b-a} \left(x - \frac{a+b}{2} \right), a \leq x \leq b \\ 0, b \leq x \end{cases} \quad (5.1)$$

$$\mu(x, b, c) = \begin{cases} s(x; c-b, c-b/2, c), x \leq c \\ 1-s(x; c, c+b/2, c+b), x \geq c \end{cases}, \quad (5.2)$$

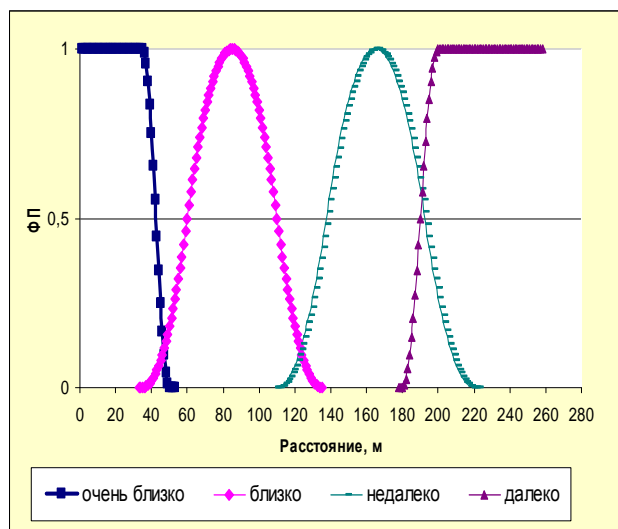
$$\text{где } s(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, x \leq a \\ 2 \left(\frac{x-a}{c-a} \right)^2, a \leq x \leq b \\ 1 - 2 \left(\frac{x-c}{c-a} \right)^2, b \leq x \leq c \\ 1, x \geq c \end{cases}$$

$$\mu(x, a, b) = \begin{cases} 0, x \leq a \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{b-a} \left(x - \frac{a+b}{2} \right), a \leq x \leq b \\ 1, b \leq x \end{cases} \quad (5.3)$$

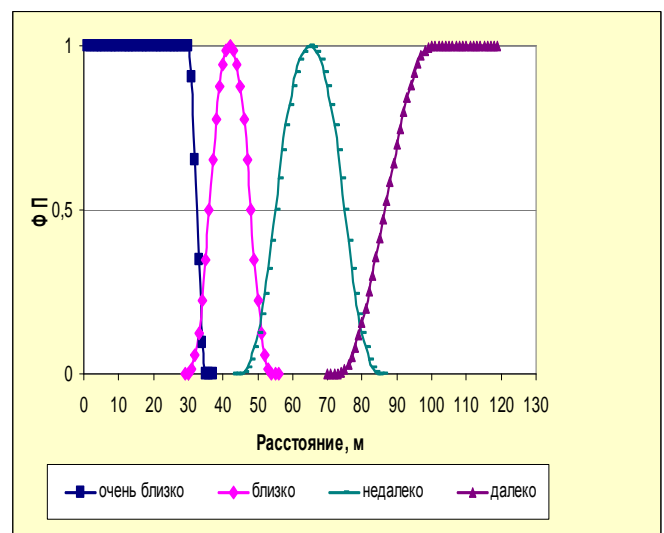
На рис. 5.9 а), б), в), г) дана графическая интерпретация функций принадлежности для требований, которые предъявляются к размещению АЗС

на городской территории и характеризующие различные условия принятия пространственно-планировочных решений.

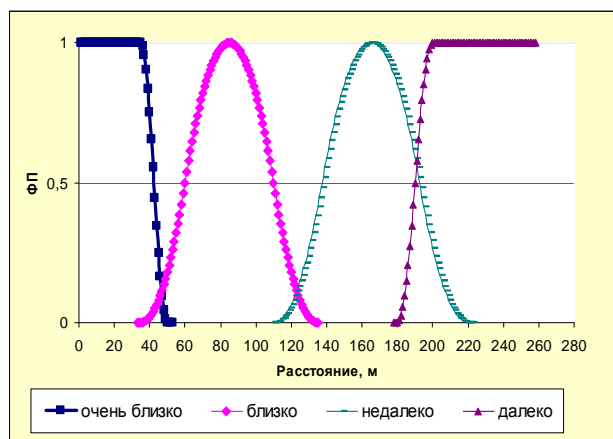
В таблицах 5.3 – 5.6 представлены базовые терм-множества, приведены аналитические зависимости и параметры функций принадлежности термов лингвистических переменных.



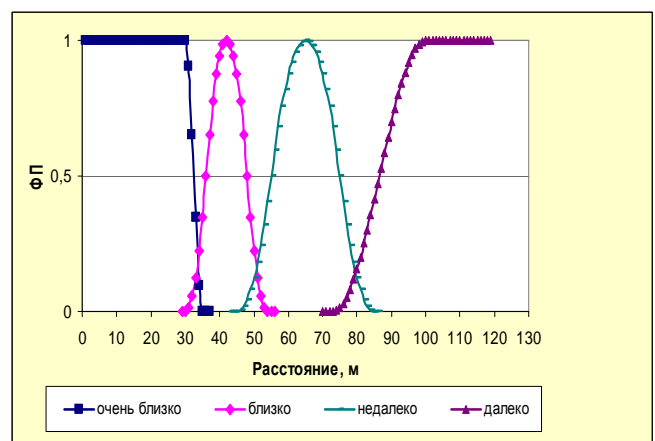
а) Расстояние от магистралей и улиц местного значения



б) Расстояние от остановок общественного транспорта



в) Расстояние от рекреационных зон



г) Расстояние от жилых и общественных зданий

Рис. 5.8 – Функции принадлежности термов лингвистических переменных

С использованием нечетких множеств запрос на поиск пригодного земельного участка на территории Коминтерновского района для размещения

АЗС с учетом требований Государственных строительных норм Украины формулируется в виде:

[**IF** (близко от магистралей и улиц местного значения),
 & (далеко от остановок общественного транспорта),
 & (далеко от рекреационных зон),
 & (очень далеко от жилых и общественных зданий),
THEN территория пригодна.

Таблица 5.3 – Вид и параметры функций принадлежности лингвистической переменной «Расстояние от магистралей и улиц местного значения»

Термы лингвистической переменной «Расстояние от магистралей и улиц местного значения»	Выражение для функции принадлежности	Значения параметров функции принадлежности
Очень близко	Уравнение (1)	a=35; b=50
Близко	Уравнение (2)	b=50; c=85
Недалеко		b=55; b=165
Далеко	Уравнение (3)	a=180; b=200

Таблица 5.4 – Вид и параметры функций принадлежности лингвистической переменной «Расстояние от остановок общественного транспорта»

Термы лингвистической переменной «Расстояние от остановок общественного транспорта»	Выражение для функции принадлежности	Значения параметров функции принадлежности
Очень близко	Уравнение (1)	a=30; b=35
Близко	Уравнение (2)	b=12; c=42
Недалеко		b=20; b=65
Далеко	Уравнение (3)	a=73; b=100

Таблица 5.5 – Вид и параметры функций принадлежности лингвистической переменной «Расстояние от рекреационных зон»

Термы лингвистической переменной «Расстояние от рекреационных зон»	Выражение для функции принадлежности	Значения параметров функции принадлежности
Близко	Уравнение (1)	a=25; b=30
Недалеко	Уравнение (2)	b=18; c=42
Далеко		b=30; c=75
Очень далеко	Уравнение (3)	a=95; b=120

Таблица 5.6 – Вид и параметры функций принадлежности лингвистической переменной «Расстояние от жилых и общественных зданий»

Термы лингвистической переменной «Расстояние от жилых и общественных зданий»	Выражение для функции принадлежности	Значения параметров функции принадлежности
Близко	Уравнение (1)	$a=25; \quad b=30$
Недалеко	Уравнение (2)	$b=62; \quad c=87$
Далеко		$b=60; \quad c=200$
Очень далеко	Уравнение (3)	$a=245; \quad b=280$

На рис. 5.10 представлен тематический слой, который содержит информацию по пригодным земельным участкам городской территории, удовлетворяющим сформулированным требованиям, для размещения АЗС. На рисунке пригодная территория обведена окружностями. Определены пять потенциальных участков, на которых возможно размещение техногенно-опасных объектов в городской черте, удовлетворяющих требованиям Государственных строительных норм.

В результате проведенных исследований предложено описание требований Государственных строительных норм Украины в виде лингвистических переменных. Для лингвистических переменных определены базовые терм-множества. Произведена соответствующая этим описаниям идентификация функций принадлежности нечетких множеств. Выбраны и обоснованы вид функций принадлежности, определены их параметры, произведена проверка выполнения требований, которые предъявляются к их построению.

Таким образом, можно сказать, что современные программные средства геоинформационных систем в своей основе используют классическую теорию множеств, что в свою очередь лишь фиксирует задаваемую точность информации, которая используется для пространственно-планировочных решений при выборе пригодной территории.

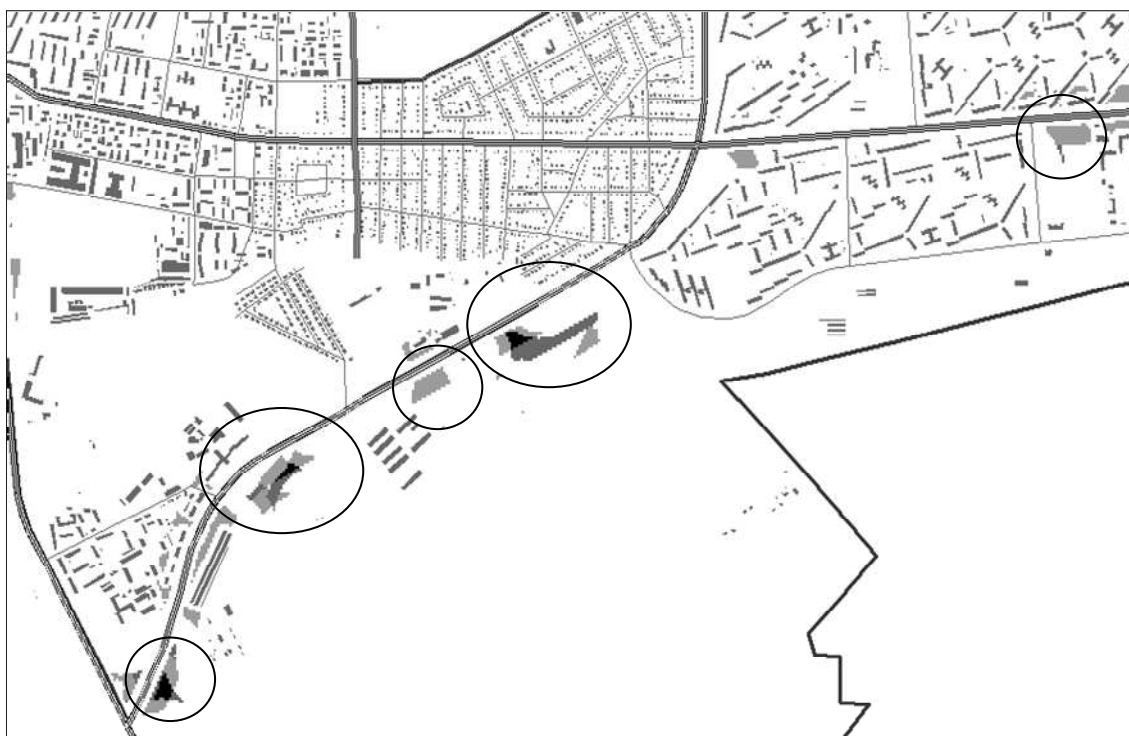


Рис. 5.9 – Тематический слой с рекомендациями по размещению АЗС

Применение нечеткой логики позволяет определить промежуточные значения для требований, которые установлены в Государственных строительных нормах Украины. Выражения подобные таким, как *далеко*, *очень далеко*, *недалеко* возможно формулировать математически и обрабатывать на компьютерах для обеспечения пространственно-планировочных решений в условиях неопределенности. Полученные результаты являются основой для построения механизма нечеткого вывода экспертной системы.

Выводы

Нарастающие информационные потоки в современном обществе, разнообразие информационных технологий, повышение сложности решаемых пространственных задач увеличивают нагрузку на лицо, принимающее решение и ставят задачу переноса проблемы выбора и принятия решений с человека на современные информационные технологии.

Анализ возможностей интеллектуализации процесса геопространственного моделирования принятия пространственно-планировочных решений, на примерах решения задачи поиска пригодной территории для размещения промышленного предприятия в пределах городской границы и задачи размещения новых градостроительных объектов на сложившейся территории показал принципиальную возможность сделать моделирование градостроительных процессов более реалистичным и прозрачным.

Как показано на практических примерах наиболее высокая эффективность в принятии пространственно-планировочных решений достигается при интеграции нечетких множеств совместно с применением геоинформационных технологий.

Совокупность разработанных методов интеллектуализации процесса моделирования составляет прикладную геопространственную технологию, применение которой к процессу принятия пространственно-планировочных решений в градостроительной деятельности позволит формулировать математически и обрабатывать на компьютерах требования, установленные в Государственных строительных нормах Украины.

Полученные результаты могут рассматриваться как основа для построения механизма нечеткого вывода муниципальной экспертной системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирование развития градостроительных систем является актуальным направлением градостроительных исследований уже более ста лет [114, 115, 116, 117]. В монографии исследуется концепция применения геопространственного моделирования развития градостроительной системы на основе использования интеграции нечетких множеств, теории однородных структур и геоинформационных технологий.

В монографии показано, как клеточно-автоматная модель развития градостроительной системы может быть применена в качестве аналитического инструмента для изучения влияния правил или факторов, лежащих в основе процесса градостроительства, кроме того, может использоваться в качестве инструмента планирования для выработки прогнозов сценария развития городов и ответить на условия представленные в виде правил «если-то».

Принципы клеточных автоматов были разработаны в рамках философии открытых систем и теории хаоса, которая утверждает, что динамическое поведение любой сложной системы основывается на процессах и взаимодействиях между объектами и элементами на локальном уровне.

Применение нечетких клеточно-автоматных моделей, рассмотренных в монографии, обеспечивает полезный инструментарий для понимания пространственно-временных процессов развития градостроительных систем на региональном уровне.

Развитие методов моделирования, основанных на системном подходе опирается на современные средства вычислительной техники и телекоммуникаций, и позволяет обеспечить качественно новую информационную поддержку принятия решений в области управления территориальным развитием как на региональном, так и на муниципальном уровне. Моделирование вышло далеко за рамки простых расчетов коэффициентов и параметров уравнений, которые описывают некоторые свойства реальных систем. Информационные технологии позволяют создавать целые виртуальные миры и исследовать на них результаты наших действий, результаты реализации принятых решений, возможные сценарии развития.

В виртуальном мире допустимы любые решения и действия, которые даже приводят к катастрофам и «гибели» такого мира. Во многих случаях

только промоделировав систему и оценив на модели возможные риски, возможно получить определенную степень уверенности в правильности и целесообразности решения при вмешательстве в реальную среду.

Однако виртуальный мир будет полезен только в том случае, если он действительно воспроизводит свойства и закономерности мира реального. Несмотря на значительное увеличение сложности и изменение способов реализации, виртуальный мир является моделью и должен удовлетворять базовым свойствам моделей, таким, как адекватность, актуальность и т.д. Создать такую модель сложных динамических и неоднородных систем, которыми являются социально-экономические системы, можно только на основе обобщения знаний экспертов в разных областях деятельности. Именно поэтому методы получения, интеграции и комплексной обработки знаний, имеют в настоящее время важное значение.

Технология моделирования является одним из вариантов практической реализации методов формализации и автоматизированной обработки знаний. Формализация концептуальной модели обеспечивает существенную автоматизацию работы с моделью – от реализации процедур анализа полноты до формирования программно-аппаратной среды управления.

Логическим продолжением исследований и практических решений в области внедрения технологий геопространственного моделирования будет разработка единственной распределенной многофункциональной среды поддержки принятия решений в области управления развитием территорий на региональном и муниципальном уровнях. Такая среда не только предоставит лицам, которые принимают решения, но и объединит их вертуальные предприятия, города, системы транспортных коммуникаций в единственный виртуальный регион, обеспечит интеграцию интеллектуальных и информационных ресурсов, которые есть в наличии в регионе или муниципальном образовании.

Применение подхода, основанного на теории однородных структур к моделированию процесса развития градостроительной системы, результаты, полученные в монографии, показывают, что структура и поведение градостроительной системы может быть сгенерирована с помощью локальных функций перехода, которые в совокупности позволяют сформировать базу знаний для выработки прогнозов сценариев развития городов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер. – М.: Наука, 1976, 120 с.
2. Аладьев В. З. Математическая биология развития / В. З. Аладьев. – Москва, изд-во Наука, 1982, 180 с.
3. Аладьев В. З. Однородные структуры: Теоретические и прикладные аспекты / В. З. Аладьев. – Киев: Респуб. изд-во Тэхника, 1990, 272 с.
4. Аладьев В. З. К теории однородных структур / В. З. Аладьев. – Таллинн: Изд-во АН ЭССР, 1972, 200 с.
5. Аладьев В. З. Научно-практическая деятельность Таллиннской исследовательской группы: Итоговые результаты за 25-летие (1969 – 1993) / В. З. Аладьев., В. Г. Тупало. – Москва: Минтопэнерго, 1994, 80 с.
6. Аладьев В. З. Научно-исследовательская активность Таллиннской исследовательской группы за период 1995 – 1998. / В. З. Аладьев., Ю. Я. Хунт, М. Л. Шишаков. – Таллинн-Гомель-Москва: TRG & VASCO Ltd, 1998, 80 с.
7. Аладьев В. З. Вопросы математической теории классических однородных структур / В. З. Аладьев., Ю. Я. Хунт, М. Л. Шишаков. – Таллинн-Гомель: Изд-во TRG & ASCO & Salcombe Eesti Ltd., 1998, 300 с.
8. Аладьев В. З. Задача о матрицах, возникающая в теории самовоспроизводящихся автоматов [Текст] / В. З. Аладьев. – Изв. АН ЭССР. Физ.-Матем., 19, № 2, 1970, С. 159-165.
9. Албегов М. М. Выбор оптимального направления развития промышленного узла// Применение математических методов в размещении производства/ М. М. Албегов., М. В. Голубицкая. – М.: Наука, 1968, 120 с.
10. Акофф Р. Планирование в больших экономических системах / Р. Акофф. – М.: Советское радио, 1972.
11. Антонович К. М. Спутниковый мониторинг земной поверхности [Текст] / К. М. Антонович, А. П., Карпик, А. Н. Клепиков. – Геодезия и картография. – 2004. – № 1. – С. 4–11.

12. Беренс В., Хавранек П. Руководство по оценке эффективности инвестиций / В. Беренс, П. Хавранек. – М.: АОЗТ «Интерэксперт», ИНФРА-М, 1995. 200 с.
13. Берлянт А. М. Геоинформатика: наука, технология, учебная дисциплина [Текст] / А. М. Берлянт. – Вестн. Моск. ун-та. Сер. геогр. – 1992. – №2. С. 1–23.
14. Берлянт А. М. Геоинформационное картографирование / А. М. Берлянт. – М.: Картгеоцентр – Геодезиздат, 1997. – 64 с.
15. Берлянт А.М. Картография: учебник для вузов / А. М. Берлянт. – М.: Аспект Пресс, 2001. – 336 с.
16. Берлянт А. М. Принципы и методика использования географических карт для формирования банков данных [Текст] / А. М. Берлянт, С. Н. Сербенюк, В. С. Тикунов.– Банки географических данных для тематического картографирования. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1987. – С. 38–47.
17. Бернштейн Ю. Б. Разработка математического и программного обеспечения кадастровых геоинформационных систем: дис. канд. техн. наук: 25.00.26 / Бернштейн Юрий Борисович. – Новосибирск, 2002. – 171 с.
18. Бондаренко Б. И. Приближенное решение задачи оптимального размещения промышленных предприятий// Математические методы в градостроительстве / Б. И. Бондаренко. – Киев: Будивельник, 1966. – 130 с.
19. Боровков А. А. Теория вероятностей / А. А. Боровков.– М.: Наука, 1986. – 190 с.
20. Бронштейн И. П. ТК созданию экономико-математических моделей генеральных планов городов // Градостроительство [Текст] / И. П. Бронштейн. – Киев: Будивельник, 1971. С. 91-100.
21. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А.Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов / И. Н. Бронштейн, К. А.Семендяев.– 13-е изд. – М.: Наука, 1986. – 544 с.
22. Бубес Э. Я. Использование математических методов в проектировании застройки жилых микрорайонов // Математические методы в градостроительстве / Э. Я. Бубес, Р. Н. Зельдович, А. И. Мартынова. – Киев: Будивельник, 1966. 180 с.

23. Бромвич М. Анализ экономической эффективности капиталовложений / М. Бромвич. – М.: ИНФРА-М, 1996. – 164 с.
24. Бугаевский Л. М. Преобразование сканерного снимка в заданную картографическую проекцию [Текст] //Труды Международного форума по проблемам науки, техники и образования /Л. М. Бугаевский, В. А. Малинников, В. П. Савиных. – М.:Академия наук о Земле, 1998. – С. 51–57.
25. Вайдлих В. Социодинамика / В. Вайдлих. – М.: УРСС, 2003. – 264 с.
26. Ванд А. Э. Методы оценки проектных решений в строительстве / А. Э. Ванд. – М.: Стройиздат, 1975. – 150 с.
27. Велихов А. А. Основы городского хозяйства / А. А. Велихов. – М.: Наука, 1996. – 250 с.
28. Варшавский В. И. Однородные структуры / В. И. Варшавский. – Москва: Изд-во Энергия, 1973. – 156 с.
29. Виленский П. А. Оценка эффективности инвестиционных проектов / П. А. Виленский, В. Н. Лившиц, С. А. Смоляк. – М.: Дело, 2001. – 225 с.
30. Волкова В. Н. Теория систем и системного анализа / В. Н. Волкова – М.: Наука, 1996. – 350 с.
31. Воронин Ю. А. Теория районирования и управления территориями / Ю. А. Воронин, Л. Ф. Спивак. – Новосибирск, 2004. – 230 с.
32. Верхаген К. Распознавание образов: состояние и перспективы / К. Верхаген, Р. Дейн, Ф. Грун. – М.: Радио и связь, 1985. – 150 с.
33. Вильсон А. Аж. Энтропийные методы моделирования сложных систем / А. Аж. Вильсон. – М.: Наука, 1978. – 225 с.
34. Габрель М. Проблеми функціонування та розвитку найбільших міських регіонів України: оцінка і шляхи вирішення [Текст] / М. Габрель // Містобудування та територіальне планування: зб. ст. К.: КНУБА, 2010. – Вип.. 36. – С. 74-82.
35. Гагарин А. И. Землепользование в условиях реформирования аграрной экономики в России / А. И. Гагарин. – Новосибирск, 2005. – 170 с.
35. Гогоберидзе А. К. Математическое моделирование городской застройки /А. К. Гогоберидзе, О. В. Цибадзе.– Сб. трудов Тбил. ЗНИИ ЭП. Вып. 1. Тбилиси, 1970. – 165 с.

36. Генике А. А. Глобальная спутниковая система определения местоположения GPS и ее применение в геодезии / А. А. Генике, Г. Г. Побединский. – М.: Картоцентр – Геодезиздат, 1999. – 272 с.
37. Геоинформатика / А. Д. Иванников, В. П. Кулагин, А. Н. Тихонов, В. Я. Цветков. – М.: МАКС Пресс, 2001. – 349 с.
38. Геоинформатика: толковый слов. основных терминов / Под ред. А. М. Берлянта и А. В. Кошкарева. – М.: ГИС-Ассоциация, 1999. – 204 с.
39. Гермейер Ю. Б. Введение в теорию исследования операций / Ю. Б. Гермейер. – М.: Наука, 1981. – 200 с.
40. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС / Под ред. В. Н. Харисова, А. И. Перова, В. А. Болдина – 2-е изд. – М.: ИПРЖР, 1999. – 560 с.
41. Глушков В.М. Введение в АСУ/ В.М. Глушков. – Киев: Техника, 1974. – 250 с.
42. Глушков В. М. Основы безбумажной информатики / В. М. Глушков. – М.: Наука, 1987. – 178 с.
43. Говор В.И. Автоматизированная система для создания топографических карт акваторий // Геодезия и картография [Текст] / В. И. Говор, В. М. Каморный, М. М. Свицерский. – 1986. – № 8. – С. 46–50.
44. Говор В. И. Разработка программных средств автоматизации картографирования // Автоматизация исследования и анализа географических данных [Текст] / В. И. Говор. – Владивосток, 1985. – С. 92–100.
45. Горелик А. Л. Современное состояние проблемы распознавания / А. Л. Горелик, И. Б. Гуревич, В. А. Скрипкин. – М.: Радио и связь, 1985 – 225 с.
46. Горелик А. Л. Методы распознавания / А. Л. Горелик, В. А. Скрипкин. – М.: Высш.шк., 1984. – 230 с.
47. Гутнов А. Э. Эволюция городского планирования / А. Э. Гутнов. – Стройиздат, 1984. – 245 с.
48. Гуляев Ю. П. Обработка цифрового изображения экологических ареалов // Материалы междунар. конф. «ИНТЕРКАРТО 3» [Текст] / Ю. П. Гуляев, А. В. Долматов. – Новосибирск, 1997. – С. 162–166.

49. Гусев А. В. Программное обеспечение автоматизированных систем картографирования // Геодезия и картография [Текст] / А. В Гусев, А. Ю. Матерук, С. А. Черкасов. – 1980. – № 6. – С. 39–42.
50. Дарховский Б. С. Квадратичные условия оптимальности для задач полубесконечного математического программирования // Труды Московского Математического Общества [Текст] / Б. С. Дарховский, Е. С. Левитин. 1985. Т. 48. – С. 163–210.
51. Дёмин Н. М., Солуха Б. В. Проблемы архитектурной экологии: Обзор / Н. М. Дёмин, Б. В. Солуха.– М.: ВНИИТАГ, 1990. – 64 с.
52. Дьомін М. М. Загальна методика формування метрополісних територій в Україні [Текст] / М. М. Дьомін, М. М. Габрель // Містобудування та терит. планув. – 2005. – Вип. 21. – С. 102–113.
53. Дёмин Н. М. Управление развитием градостроительных систем / Н. М. Дёмин. – К.: Будівельник, 1991. – 184 с
54. Де Мерс, Майкл Н. Географические информационные системы. Основы. Пер. с англ. / Де Мерс, Н. Майкл. – М.: Дата+, 1999. – 179 с.
55. Денисов А. А. Теория больших систем управления / А. А. Денисов, Д. Н. Колесников. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 279 с.
56. Джордж Ф. Основы кибернетики / Ф. Джордж. – М.: Радио и связь, 1984. – 200 с.
57. Дуда Р. Распознавание образов и анализ сцен / Р. Дуда, П. Харт. – М.: Мир, 1976. – 325 с.
58. Думлер С. А. Управление производством и кибернетика / С. А Думлер. – М.: Машиностроение, 1969. – 157 с.
59. Ермольев Ю. М. Стохастические модели и методы в экономическом планировании / Ю. М. Ермольев, А. И. Ястремский. – М.: Наука, 1979. – 200 с.
60. Журкин И. Г. Выбор критерия и пространства свойств для оценки эффективности инструментально-программных средств ГИС // Информационные технологии. – 1999. – № 3. – С. 28.
61. Заков А. И. Модель оптимизации планировочной структуры города // Применение математических методов и вычислительной техники в градостроительстве [Текст] / А. И. Заков. – М.: ЦНИИПГрадостроительства, 1971. – С. 312.

62. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л.Заде Л.– М.: Мир, 1976. – 246 с.
63. Карпик А. П. Базовые функции инструментальных программных средств ГИС [Текст] / А. П. Карпик // Геодезия и аэрофотосъемка. – 2004. – № 5. – С. 139–149.
64. Карпик А. П. Концепция геоинформационного пространства [Текст] / А. П. Карпик // Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 225-летию МИИГАиК. Ч. Геодезия. – М.: МИИГАиК, 2004. – С. 434–438.
65. Карпик А. П. Математическое обеспечение ГИС [Текст] / А. П. Карпик Ю. Б. Бернштейн // Изв. вузов. Сер. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2002. – № 2. – С. 106–110.
66. Карпинський Ю. Стратегія формування національної інфраструктури геопросторових даних в Україні / Ю. Карпинський, А. Лященко. – К.: НДІГК, 2006. – 108 с.
67. Капитоненко В. В. Финансовая математика и ее приложения / В. В. Капитоненко. – М.: Приор, 2000. – 280 с.
68. Кемени Дж. Кибернетическое моделирование / Дж. Кемени, Дж. Снелл. – М.: Советское радио, 1972. – 200 с.
69. Кемени Дж. Кибернетическое моделирование / Дж Кемени, Дж Снелл. – М.: Советское радио, 1972. – 156 с.
70. Кини Р. А. Принятие решений при многих критериях / Р. А. Кини, Х. Райфа. – М.: Радио и связь, 1981. – 200 с.
71. Киппер Э. Я. Об экономической оценке территориальных ресурсов развития города // Экономика и математические методы [Текст] / Э. Я. Киппер, А. Х. Таремяз. – 1973. Т. IX. № 2. С. 310-316.
72. Ключниченко Є. Є. Управління містом: Навчальний посібник для студ. вищих навч. закл. / Є. Є. Ключниченко. – Київський національний ун-т будівництва і архітектури. – К. : КНУБА, 2003. – 260 с.
73. Патракеев И.М. Организация парковок в крупном городе на основе пространственно-точном моделировании [Текст] / И. М. Патракеев, В. Е. Жуков, О. Г. Леонтьева. – Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского. Серия «География». Том 23 (62). 2010 г. №2. С.222 – 232.

74. Патракеєв, І. М. Геоінформаційне забезпечення прийняття просторово-планувальних рішень при управлінні урбанізованими територіями в умовах невизначеності [Текст] / І. М. Патракеєв, О. Г. Міхно, Д. В. Шаульський. – Вісник геодезії та картографії. 2010 г. № 6. С.29-33.
75. Патракеєв, І. М. Геоинформационное обеспечение пространственно-планировочных решений в условиях неопределенности [Текст] / И. М. Патракеєв, Е. О. Андрющенко, В. Е. Жуков. – Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2010 г. № 3/6(45). С.45-50.
76. Патракеєв, І. М. Агентная модель движения транспорта на перекрестке [Текст] / И. М. Патракеєв, В. А. Толстохатко, Аль-Манасра Рами Анвар. – Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2011 г. № 3/4 (51). С.63-67.
77. Петере Э. Хаос и порядок на рынках капитала / Э. Петере. – М.: Мир, 2000. – 235 с.
78. Петраковська О. С. Методологія управління системою землекористування великих міст: дис. ... док. тех. наук: 05.24.04 / Петраковська Ольга Сергіївна. – КНУБА, Київ, 2007. – 223с.
79. Петров А. А. Опыт математического моделирования экономики / А. А. Петров, И. Г. Поспелов, А. А. Шананин. – М.: Энергоатомиздат, 1996. – 258 с.
80. Подиновский В. В., Ногин В. Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В. В. Подиновский, В. Д. Ногин. – М.: Наука, 1982. – 376 с.
81. Полтерович В. М. Экономическое равновесие и хозяйственный механизм / В. М. Полтерович. – М.: Наука, 1990. – 172 с.
82. Попков Ю. С. Теория макросистем и ее приложения / Ю. С. Попков. – М.: УРСС, 1999. – 350 с.
83. Попков Ю. С. Оптимизация и идентификация нелинейных стохастических систем / Ю. С. Попков, О. П. Киселев, Н. П. Петров, Б. А. Шмультян. – М.: Энергия, 1983. – 275 с.
84. Попков Ю. С. Системный анализ и проблемы развития городов / Ю. С. Попков, М. В. Посохин, А. Э. Гутнов, Б. А. Шмультян. – М.: Наука, 1983. – 320 с.
85. Пригожий И. От существующего к возникающему / И. Пригожий. – М.: УРСС, 2002. – 180 с.

86. Лященко А. А. Концептуальне моделювання геоінформаційних систем / А. А. Лященко [Текст] // Вісник геодезії та картографії. – 2002. – №4. С. 44–50.
87. Лященко А. А. Активні міські геоінформаційні ресурси: класифікація, властивості та принципи формування [Текст] / А. А. Лященко // Інженерна геодезія. – Наук.- техн. зб. – Вып.48. – К.: КНУБА, 2002. – С. 147–156.
88. Лихогруд М. Г. Концепція створення автоматизованої системи державного земельного кадастру [Текст] / М. Г. Лихогруд. // Землевпорядний вісник. – 2001. – №4. С. 60 – 69.
89. Месарович М. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, И. Такахар. – М.: Мир, 1973. –148 с.
90. Маршалл А. Принципы экономической науки / А. Маршалл. – Т. 1-3. М.: Прогресс Универс, 1993. – 350 с.
91. Кирута А. Я. Оптимальный выбор распределений в сложных социально экономических задачах / А. Я. Кирута, А. М. Рубинов, Е. Б. Яновская. – Л.: Наука, 1980. – 225 с.
92. Культурное пространство региона [Электронный ресурс] / Томский государственный университет.– 2007.–Режим доступа: www.tsias.ru/cdo/index. – Дата доступа: 08.10.2007.
93. Нейман Дж. фон. Теория игр и экономическое поведение / Дж. фон Нейман, О. Моргенштерн.– М.: Наука,1970.– 230 с.
94. Нудельман В. И. Опыт применения экономико-математических методов при выборе мест размещения промышленных новостроек// Математические методы в градостроительстве / В. И. Нудельман, А. Д. Пацера.– Киев: Будивельник, 1966.– 156 с.
95. Никулина Ю. Н. Функциональное пространство города и городское управление [Текст] / Ю. Н. Никулина.– Науч. тр. акад. упр. при Президенте Респ. Беларусь. – Минск: Акад.упр. при Президенте Респ. Беларусь, 2008. Т. 2. – С. 123 -129.)
96. Осітнянко А. П. Планування розвитку міста: Монографія / А. П. Осітнянко. – К.: КНУБА, 2001. – 460с.
97. Райфа Х. Анализ решений / Х. Райфа. – М.: Наука, 1977. – 176 с.
98. Ресин В. И. Развитие больших городов в условиях переходной экономики / В. И. Ресин, Ю. С. Попков. – М.: УРСС, 2000. – 276 с.

99. Ресин В. И. Управление развитием крупного города: опыт системного подхода / В. И. Ресин. – М.: Голос, 1996. – 200 с.
100. Соломина О. А. Универсальный симулятор на основе клеточного автомата [Текст] / О. А. Соломина, А. А. Арзамасцев. – Вестн. Тамб. ун-та. Сер. Естеств. и техн. науки. Тамбов, 2008. Т.13. Вып. 1. С. 109–111.
101. Самарский А. А. Математическое моделирование / А. А. Самарский, А. П. Михайлов. – М.: Наука, 2001. – 245 с.
102. Смоляк С. А. Об учете разброса эффекта при расчетах экономической эффективности в условиях неопределенности [Текст] / С. А. Смоляк // Модели и методы стохастической оптимизации. М., 1983. С. 181—212.
102. Смоляр И. М. Новые города / И. М. Смоляр. – М.: Стройиздат, 1972. – 200 с.
103. Фільваров Г. Й. Основні методичні напрями розроблення нового генерального плану Києва [Текст] / Г. Й. Фільваров, А. М. Плешкановська // Містобудування та територіальне планування: зб. ст. К. : КНУБА, 2009. – Вип.. 32. – С. 448–456
104. Фильваров Г. И. Социально-пространственная организация производственного комплекса крупного города / Г. И. Фильваров. – Градостроительство. – Киев, Будивельник, 1983. – 200 с.
105. Фишберн П. Теория полезностей для принятия решений / П. Фишберн. – М., 1978. – 180 с.
106. Форрестер Дж. Динамика развития городов / Дж. Форрестер. – М.: Прогресс, 1974. – 250 с.
107. Форрестер Дж. Мировая динамика / Дж. Форрестер. – М.: Наука, 1978. – 340 с.
108. Automata, Languages and Development.- Amsterdam: North-Holland, 1976.
109. Achasova S., Bandman O., Markova V., Piskunov S. Parallel Substitution Algorithms :Theory and Application.- Singapore: World Scientific, 1995, 190 p.
110. Adamatzky A. Identification of Cellular Automata.- London: Taylor & Francis, 1994
111. Abel, D. J., Kilby, P. J. and Davis, J. R. 1994. The systems integration problem. International Journal of Geographical Information Systems 8: 1–12.
112. Allen, P. M. 1997. Cities and regions as evolutionary, complex systems. Geographical Systems 4: 103–30.

113. Altman, D. 1994. Fuzzy set theoretic approaches for handling imprecision in spatial analysis. *International Journal of Geographical Information Systems* 8: 271 – 89.
114. Batty M. Generating Urban Forms from Diffusive Growth // *Environment and Planning, A*, 23, 1991, pp. 511– 544.
115. Batty, M. 1981. Urban models. In *Quantitative geography: a British view*, Eds. N. Wrigley and R. J. Bennett, 181–91. London: Routledge and Kegan Paul.
116. Batty, M. and Howes, D. 1996. Exploring urban development dynamics through visualization and animation. In *Innovation in GIS 3*, Ed. D. Parker, 149 – 61. London: Taylor and Francis.
117. Batty M. Cities as Fractals: Simulating Growth and Form // *Fractals and Chaos* / Eds. A.J.Crilly et al.- Berlin-New York: Springer Verlag, 1991.
118. Bellman R. Introduction to Artificial Intelligence.- San Francisco: Boyd&Fraser, 1978.
119. Brender R. A Programming System for the Simulation of Cellular Spaces.- Ann Arbor: The University of Michigan, 1970, 180 p.
120. Bura S. et al. Multi-Agents Systems and the Dynamics of a Settlement System. Universite Paris IV, Equipe P.A.R.I.S., CNRS et Universite Paris I, 1994.
121. Barnsley, M. and Barr, S. 1996. Inferring urban land-use from satellite sensor images using kernel-based spatial re-classification. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 62: 949 – 58.
122. Barnsley, M. and Barr, S. 1997. Distinguishing urban land-use categories in fine spatial resolution land-cover data using a graph-based, structural pattern recognition system. *Computers, Environment and Urban Systems* 21:209–25.
123. Bassett, K. and Short, J. 1989. Development and diversity in urban geography. In *Horizons in human geography*, Eds. D. Gregory and R. Walford, 175 – 93. London: Macmillan.
124. Clarke, K. C. and Gaydos, L. J. (1998) «Loose-coupling a cellular automaton model and GIS: long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore», *International Journal Geographical Information Sciences*, vol. 12, PP. 699 – 714.

125. Clarke K, Hoppen S & Gaydos L, 1997, A self-modifying cellular automaton of historical urbanization in the San Francisco Bay area, *Environment and Planning B*, vol. 24, PP. 247 – 261.
126. Cellular Automata / Eds. T. Toffoli, R. Vollmar, Report, 108, Saarbrücken, 1995.
127. Cordon O., Herrera F., A General study on genetic fuzzy systems // *Genetic Algorithms in engineering and computer science*, 1995. – P. 33 – 57.
128. Garzon M. Models of Massive Parallelism: Analysis of Cellular Automata and Neural Networks.-Berlin: Springer-Verlag, 1995, 272 p.
129. Rozenberg G. Bibliography of L-Systems // *Theoret. Comput. Sciences*, 5, no. 1, 1977.
130. Waddell, P. Integrated land use and transportation planning and modeling: addressing challenges in research and practice, *Transport Reviews*, 2002, Vol. 31, 209 – 229.
131. Waddell, P. UrbanSim: Modeling urban development for land use, transportation and environmental planning, *Journal of the American Planning Association*, 2011, Vol. 68, 297 – 314.
132. Margolus N. CAM-8: A Computer Architecture Based on Cellular Automata.- Fields Institute Communications, 6, 1996, PP. 167 – 187.
133. Gaylord R., Nishitate K. Modeling Nature: Cellular Automata Simulations with Mathematica.-Berlin-Heidelberg-London: Springer, 1996, 234 p.
134. Reiter C. Life and Death on a Computer Screen.- *Discover* (August 1984), PP. 81 – 83
135. Legendi T. Cellprocessors in Computer Architecture // *Comp. Linguist. and Comp. Languages*, 11, no. 2, 1976, PP. 147 – 167.
136. Gardner M. *Wheeler's Life and Other Mathematical Amusements*.- N.Y.: Freeman, 1983.
137. Kosko B. Fuzzy systems as universal approximators // *IEEE Transactions on Computers*, vol. 43, No. 11, November 1994. – P. 1329 – 1333.
138. Kari J. *Decision Problems Concerning Cellular Automata*. – Turku: University of Turku, 1990
139. Voorhees B. *Computational Analysis of One-Dimensional Cellular Automata*. – Singapore: World Scientific, 1996, 134 p.
140. ESRI. 2004a. *ArcGIS Desktop Help*. Redlands, California: ESRI Press.

141. ESRI. 2004b. ArcGIS 9: ArcGIS Desktop Developer Guide. Redlands, California: ESRI Press.
142. Fischer, M. M. and Nijkamp, P. 1992. Geographical information systems and spatial analysis. *Annals of Regional Science* 26: 5 – 17.
143. Fischer, M. M., Scholten, H. J. and Unwin, D. 1996. Spatial analytical perspectives on GIS. London: Taylor and Francis.
144. Flanagan, W. G. 1990. Urban sociology: images and structure. Sydney: Allyn and Bacon.
145. Spearritt, P. and DeMarco, C. 1988. Planning Sydney's Future. Sydney: Allen & Unwin.
146. Statistics Canada. 1996. About 1996 Census Tables on the Internet. Statistics Canada. <http://www.statcan.ca/english/census96/about.html> (accessed May 2, 2008).
147. Stevens, D. and Dragircevi rc, S. 2007. A GIS-based irregular cellular automata model of landuse change. *Environment and Planning B: Planning and Design* 34: 708 – 24.
148. Story, M. and Congalton, R. G. 1986. Accuracy assessment, a user's perspective. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 52: 397–9.
149. International Journal of Geographical Information Sciences 12: 651–71.
Sui, D. Z. and Zeng, H. 2001. Modeling the dynamics of landscape structure in Asia's emerging desakota regions: a case study in Shenzhen. *Landscape and Urban Planning* 53: 37 – 52.
150. Syphard, A. D., Clarke, K. C. and Franklin, J. 2005. Using a cellular automaton model to forecast the effects of urban growth on habitat pattern in southern California. *Ecological Complexity* 2: 185 – 203.
151. Takeyama, M. and Couclelis, H. 1997. Map dynamics: integrating cellular automata and GIS through Geo-Algebra. *International Journal Geographical Information Sciences* 11: 73 – 91.
152. Theobald, D. M. and Hobbs, N. T. 1998. Forecasting rural land-use change: a comparison of regression- and spatial transition-based models. *Geographical and Environmental Modelling* 2: 65 – 82.
153. Theodoridis, S. and Koutroumbas, K. 1999. Pattern recognition. San Diego: Academic Press.
154. Thomas, R. W. and Huggett, R. J. 1980. Modelling in geography: a mathematical approach. New Hersey: Barnes & Noble Books.

155. Tobler, W. R. 1970. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic Geography* 26: 234 – 40.
156. Tobler, W. R. 1979. Cellular Geography. In *Philosophy in Geography*, Eds. S. Gale and G. Olsson, 379 – 86. Dordrecht, Netherlands: D. Reidel.
157. Toffoli, T. and Margolus, N. 1987. *Cellular Automata Machines*. Cambridge: The MIT Press.
158. Torrens, P. M. 2000. How cellular models of urban systems work (1. theory). Centre for Advances Spatial Analysis Working Paper 28. University College London, UK. [http:// www.casa.ucl.ac.uk/working_papers.htm](http://www.casa.ucl.ac.uk/working_papers.htm) (accessed May 2, 2008).
159. Takacs D. A Maximum-Selector Design in CODD-ICRA Cellular Automata // *Cybernetics*, no. 7, 1977, PP. 105 – 144.
160. Takeyama, M. and Couclelis, H. 1997. Map dynamics: integrating cellular automata and GIS through Geo-Algebra. *International Journal Geographical Information Sciences* 11: 73 – 91.
161. Theoretical and Practical Issues on Cellular Automata, Proceedings of the Fourth International Conference on Cellular Automata for Research and Industry (ACRI 2000), Cellular Models of Urban Systems David O’Sullivan Paul M. Torrens, June, 2000.
162. Torrens, P. M. 2003. Automata-based models of urban systems. In *Advanced Spatial Analysis: the CASA Book of GIS*, Eds. P. Longley and M. Batty, 61–81. Redlands, California: ESRI Press.
163. Torrens, P. M. and Benenson, I. 2005. Geographic Automata Systems. *International Journal of Geographical Information Science*, 19: 385 – 412.
164. Waddell, P. Integrated land use and transportation planning and modeling: addressing challenges in research and practice, *Transport Reviews*, 2002, Vol. 31, 209–229.
165. Waddell, P. UrbanSim: Modeling urban development for land use, transportation and environmental planning, *Journal of the American Planning Association*, 2011, Vol. 68, 297 – 314.
166. Wilson, A. G. 1989. Classics, modelling and critical theory: human geography as structured pluralism. In *Remodelling geography*, Ed. W. Macmillan, 61 – 9. Oxford: Basil Blackwell.
167. Wingo, L. 1961. *Transportation and urban land*. Baltimore, MD: John Hopkins University Press.

168. Winston, D. 1957. Sydney's great experiment: the progress of the Cumberland County Plan. Sydney: Halstead Press.
169. Wolfram, S. 2002. A New Kind of Science. Champaign, Illinois: Wolfram Media.
- Woodcock, C. E. and Gopal, S. 2000. Fuzzy set theory and thematic maps: accuracy assessment and area estimation. *International Journal of Geographical Information Science* 14: 153–72.
170. Wu, F. 1996. A linguistic cellular automata simulation approach for sustainable land development in a fast growing region. *Computers, Environment, and Urban Systems* 20: 367 – 87.
171. Wu, F. 1998b. Simulating urban encroachment on rural land with fuzzy-logic-controlled cellular automata in a geographical information system. *Journal of Environmental Management* 53: 293 – 308.
172. Yang, X. and Lo, C. P. 2003. Modelling urban growth and landscape change in the Atlanta metropolitan area. *International Journal of Geographical Information Science* 17: 463–88.
173. Yeh, A. G. and Li, X. 2006. Error and uncertainties in urban cellular automata. *Computers, Environment, and Urban Systems* 30: 10 – 28.

Наукове видання

ПАТРАКЕЄВ Ігор Михайлович

**ГЕОПРОСТОРОВІ ТЕХНОЛОГІЇ
В МОДЕЛЮВАННІ
МІСТОБУДІВНИХ СИСТЕМ**
(рос. мовою)

Монографія

Відповідальний за випуск *К. А. Мамонов*

Редактор *З. І. Зайцева*

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

Дизайн обкладинки *І. М. Патракеєв*

Підп. до друку 06.02.2014

Формат 60x84/16

Друк на ризографії.

Ум. друк. арк. 12,2

Тираж 300 пр.

Зам. №

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Революції, 12, Харків, 61002

Електронна адреса: rektorat@kname.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 4705 від 28.03.2014 р.